

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Леонтьев Филипп Александрович

Проблемы захоронения радиоактивных отходов в глинах

Выпускная квалификационная работа бакалавра

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., проф. Г.Н. Белозерский

Санкт-Петербург

2017

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	2
ВСТУПЛЕНИЕ	3
1. РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ	6
1.1. Источники образования и классификации радиоактивных отходов	6
1.2. Способы захоронения радиоактивных отходов	12
1.3. Захоронение радиоактивных отходов за рубежом	14
1.4. Захоронение радиоактивных отходов на территории.....	17
Российской Федерации	17
2. ГЛИНЫ КАК СРЕДА ДЛЯ ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ	23
2.1. Классификация и основные свойства глин.....	23
2.2. Характеристика территории, планируемой для размещения пункта приповерхностного захоронения радиоактивных отходов в отложениях глин Ленинградской области.....	29
2.3. Геологическое строение перспективного участка для размещения пункта захоронения радиоактивных отходов	31
2.4. Оценка экологических последствий возможной радиационной аварии при проникновении радионуклидов из пункта захоронения радиоактивных отходов в вендский водоносный комплекс	36
2.5. Ситуация с захоронением радиоактивных отходов в толще верхнекотлинских глин (г. Сосновый Бор)	41
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	44
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	47

ВСТУПЛЕНИЕ

В XX веке человечество открыло для себя новую отрасль энергетики – атомную энергетику, позволившую увеличить количество производимой электрической и тепловой энергии.

Ядерная энергия – энергия, освобождающаяся в результате внутренней перестройки атомных ядер [1]. Основные источники ядерной энергии:

1. реакции деления тяжелых ядер (ядерный реактор, атомная бомба);
2. термоядерные реакции – реакции синтеза (соединения) легких ядер (термоядерный реактор, водородная бомба);
3. радиоактивный распад.

Запуск первого в мире ядерного реактора произошел в декабре 1942 г. в Чикаго (США, Иллинойс) под руководством итальянского физика Э. Ферми. В качестве топлива был использован необогащенный ^{235}U , в качестве замедлителя нейтронов – графит. Опыт по достижению надкритического состояния с развитием самоподдерживающейся цепной ядерной реакции был успешен. В СССР первый ядерный реактор был запущен в декабре 1946 г. в Москве под руководством И.В. Курчатова.

Июнь 1954 г. – ввод в эксплуатацию Обнинской АЭС, первой в мире атомной электростанции, расположенной в г. Обнинск Калужской обл. Реактор АМ-1 серии РБМК (реактор большой мощности канальный) представлял собой графитовый реактор канального типа на тепловых нейтронах с трубчатыми ТВЭЛ¹-ами, охлаждаемый водой. Тепловая мощность реактора составляла ~ 30 МВт. Значения электрической мощности АЭС в разные годы находились в пределах от 3 до 5 МВт, КПД доходил до 17%. Топливная загрузка – примерно 560 кг урана, обогащенного по ^{235}U до 5-10 %. В апреле 2002 г. работа ректора была прекращена из-за нерентабельности [2].

По данным Всемирной ядерной ассоциации (World Nuclear Association, WNA), 447 действующих ядерных реактора снабжают электроэнергией 31 страну мира. За 2014 год атомные реакторы мира произвели около 2,5 тыс. ТВт-ч электроэнергии, что составило около 10 % общемирового производства электроэнергии [3].

¹ ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент

На рисунке, представленном ниже, можно увидеть, какие регионы мира лидируют в производстве ядерной энергии и где строятся новые электростанции.

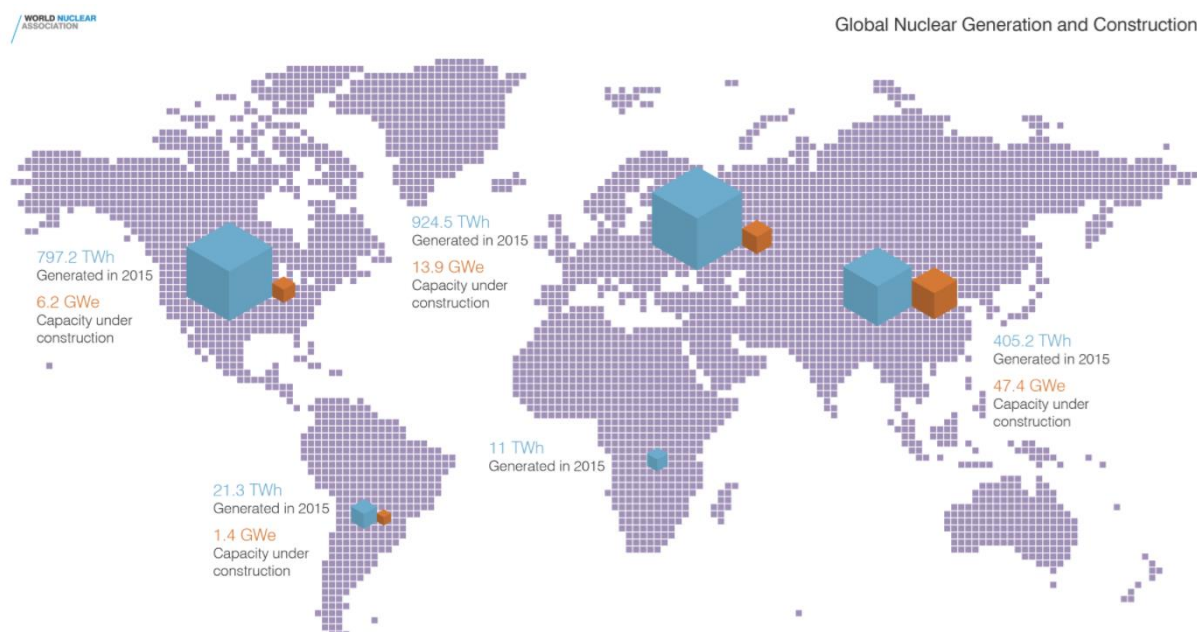


Рисунок 1. Производство электроэнергии и мощности строящихся АЭС в мире [3]

Достоинствами атомной энергетики являются большие запасы потенциально пригодного ядерного топлива с учетом его воспроизводимости, отсутствие нарушений биогеохимических циклов кислорода из-за «сжигания» топлива в реакторе без окислителей, т.е. без затрат кислорода.

Существует и ряд проблем, связанных с воздействием объектов ядерного комплекса на человека и природную среду: последствия воздействия ионизирующих излучений и возможных радиационных аварий, проблемы обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО). Кроме того, объекты ядерного топливного цикла оказывают также и нерадиационное воздействие на биосферу, обусловленное отчуждением земель, сбросным теплом, выбросом влаги в атмосферу и промышленными стоками химических загрязнителей [4].

Наиболее актуальной из приведенных выше является проблема обращения с РАО и ОЯТ. В силу некоторых особенностей, присущих нашей стране, практические шаги по ее решению откладывались до тех пор, пока они не стали остро необходимыми: нынешняя ситуация, сложившаяся с хранением и захоронением РАО и ОЯТ, не соответствует современным требованиям охраны природы и законодательству Российской Федерации. Захоронение отходов в глинах – практически возможный и один из самых

действенных способов окончательной изоляции твердых и отвержденных радиоактивных отходов.

Актуальность темы данной работы связана с тем, что:

1. Во-первых, объемы накопленных на территории России РАО наибольшие в мире; кроме того, преобладающая их часть не захоронена;
2. Во-вторых, 11 июля 2011 года был принят закон N 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», который обязывает захоранивать все классы радиоактивных отходов, кроме короткоживущих, удельная активность которых в результате распада радионуклидов за время хранения может быть снижена до уровня, при котором такие отходы перестают быть радиоактивными.

Цель данной работы – проанализировать основные проблемы, связанные с захоронением образовавшихся на территории Ленинградской области РАО в глинах на примере участка предполагаемого строительства пункта захоронения радиоактивных отходов вблизи г. Сосновый Бор. Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Рассмотреть пути образования и основы классификаций радиоактивных отходов; изучить существующие способы окончательной изоляции радиоактивных отходов;
2. Проанализировать сложившиеся за рубежом и в России ситуации с захоронением радиоактивных отходов;
3. Изучить классификации и основные свойства глинистых пород, позволяющие считать их перспективной средой для захоронения радиоактивных отходов;
4. Дать характеристику территории и рассмотреть геологическое строение участка, перспективного для размещения пункта захоронения радиоактивных отходов в глинах;
5. Оценить масштаб возможных экологических последствий гипотетической катастрофической радиационной аварии при проникновении радионуклидов из пункта захоронения радиоактивных отходов в вендский водоносный комплекс или прямо в Финский залив.

1. РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

Первое определение термина «радиоактивные отходы» появилось в документе «Нормы радиационной безопасности. НРБ-76/87» и гласило, что радиоактивные отходы – неиспользуемые жидкие и твердые радиоактивные вещества, образующиеся в результате деятельности учреждения, общая активность, удельная активность и радиоактивное загрязнение поверхностей которых превышает уровни, установленные в данных документах. Следует отметить, что газообразные радиоактивные вещества по данному определению не считались радиоактивными отходами.

В действующем Федеральном законе от 21.11.1995 N 170-ФЗ (ред. от 03.07.2016) «Об использовании атомной энергии» содержится следующее определение: радиоактивные отходы – не подлежащие дальнейшему использованию материалы и вещества, а также оборудование, изделия (в том числе отработавшие источники ионизирующего излучения), содержание радионуклидов в которых превышает уровни, установленные в соответствии с критериями, установленными Правительством Российской Федерации (в ред. Федерального закона от 11.07.2011 N 190-ФЗ).

1.1. Источники образования и классификации радиоактивных отходов

Радиоактивные отходы образуются [7]:

- при эксплуатации и снятии с эксплуатации предприятий ядерного топливного цикла (добыча и переработка радиоактивных руд, изготовление тепловыделяющих элементов, производство электроэнергии на АЭС, переработка отработавшего ядерного топлива);
- в процессе реализации военных программ по созданию ядерного оружия, консервации и ликвидации оборонных объектов и реабилитации территорий, загрязненных в результате деятельности предприятий по производству ядерных материалов;
- при эксплуатации и снятии с эксплуатации кораблей военно-морского и гражданского флотов с ядерными энергетическими установками и баз их обслуживания;
- при использовании радионуклидов в народном хозяйстве, медицинских учреждениях и в научно-исследовательских учреждениях;

- в результате проведения ядерных взрывов в интересах народного хозяйства, при добыче полезных ископаемых, выполнении космических программ, а также при авариях на атомных объектах.

По состоянию на начало этого столетия, около 99% суммарной активности РАО, которая составляет около $8,2 \times 10^{19}$ Бк, обусловлено деятельностью в военной области, связанной с наработкой оружейного плутония [7].

В настоящее время в Российской Федерации принята следующая классификация РАО (п.п. 2 ст. 4 Федерального закона от 11 июля 2011 года N 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»):

1. Удаляемые радиоактивные отходы – радиоактивные отходы, для которых риски, связанные с радиационным воздействием, иные риски, а также затраты, связанные с извлечением таких радиоактивных отходов из пункта хранения радиоактивных отходов, последующим обращением с ними, в том числе захоронением, не превышают риски и затраты, связанные с захоронением таких радиоактивных отходов в месте их нахождения;
2. Особые радиоактивные отходы – радиоактивные отходы, для которых риски, связанные с радиационным воздействием, иные риски, а также затраты, связанные с извлечением таких радиоактивных отходов из пункта хранения радиоактивных отходов, последующим обращением с ними, в том числе захоронением, превышают риски и затраты, связанные с захоронением таких радиоактивных отходов в месте их нахождения.

В свою очередь, удаляемые радиоактивные отходы классифицируются по следующим признакам:

- В зависимости от периода полураспада содержащихся в радиоактивных отходах радионуклидов: долгоживущие радиоактивные отходы и короткоживущие радиоактивные отходы;
- В зависимости от значения удельной активности: высокоактивные радиоактивные отходы, среднеактивные радиоактивные отходы, низкоактивные радиоактивные отходы и очень низкоактивные радиоактивные отходы;
- В зависимости от агрегатного состояния: жидкие радиоактивные отходы, твердые радиоактивные отходы и газообразные радиоактивные отходы;

- В зависимости от содержания ядерных материалов: радиоактивные отходы, содержащие ядерные материалы и радиоактивные отходы, не содержащие ядерных материалов;
- Отработавшие закрытые источники ионизирующего излучения;
- Радиоактивные отходы, образовавшиеся при добыче и переработке урановых руд;
- Радиоактивные отходы, образовавшиеся при осуществлении не связанных с использованием атомной энергии видов деятельности по добыче и переработке минерального и органического сырья с повышенным содержанием природных радионуклидов.

Однако стоит отметить, что в данный момент критерии, определенные в п.п. 2 ст. 4 Федерального закона № 190-ФЗ, не установлены, поэтому при обращении с радиоактивными отходами действует классификация РАО в соответствии с Основными санитарными правилами обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ - 99/2010), утвержденными Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 N 40 (ред. от 16.09.2013):

3.12.1. Отходы, содержащие техногенные радионуклиды, относятся к радиоактивным отходам, если сумма отношений удельных активностей (для газообразных отходов сумма отношений объемных активностей) техногенных радионуклидов в отходах к их предельным значениям, приведенным в приложении 5 к Правилам, превышает 1.

Таблица 1. Предельные минимальные значения удельной и объемной активностей основных дозообразующих радионуклидов в отходах для отнесения их к радиоактивным отходам [9]

N п/п	Вид радионуклида	Период полураспада радионуклида	Предельные значения удельной активности, Бк/г		Предельные значения объемной активности (газообразные отходы), Бк/м ³
			твердые отходы	жидкие отходы	
66.	Sr-90	29,1 года	1×10^2	0,49	2,7
123.	I-131	8,04 суток	1×10^2	0,62	7,3
137.	Cs-137	30,17 года	10	1,1	27

При невозможности определения суммы отношений удельных активностей радионуклидов в отходах к их предельным значениям, приведенным в приложении 5 к Правилам, отходы, содержащие техногенные радионуклиды, относятся к радиоактивным, если удельная активность радионуклидов в отходах превышает:

- для твердых отходов:

1 Бк/г - для альфа-излучающих радионуклидов;

100 Бк/г - для бета-излучающих радионуклидов.

- для жидких отходов:

0,05 Бк/г - для альфа-излучающих радионуклидов;

0,5 Бк/г - для бета-излучающих радионуклидов.

Отходы с повышенным содержанием природных радионуклидов относятся к радиоактивным отходам в случае, если выполняются следующие условия:

- для твердых отходов:

$$A_{Ra} + 1,3 \times A_{Th} + 0,09 \times A_K > 10 \text{ Бк/г},$$

- для жидких отходов:

$$A_U + 2,14 \times A_{Th} > 0,13 \text{ Бк/г},$$

где: A_{Ra} , A_{Th} , A_K , A_U – удельные активности ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K и ^{238}U соответственно, Бк/г.

Предполагается, что радионуклиды ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{238}U в отходах находятся в радиоактивном равновесии со своими дочерними радионуклидами.

По удельной активности твердые радиоактивные отходы, содержащие техногенные радионуклиды, за исключением отработавших закрытых радионуклидных источников, подразделяются на 4 категории: очень низкоактивные, низкоактивные, среднеактивные и высокоактивные, а жидкие радиоактивные отходы - на 3 категории: низкоактивные, среднеактивные и высокоактивные (табл. 2).

Таблица 2. Классификация жидких и твердых радиоактивных отходов [9]

Категория отходов	Удельная активность, кБк/кг			
	Тритий	бета-излучающие радионуклиды (исключая тритий)	альфа-излучающие радионуклиды (исключая трансурановые)	Трансурановые радионуклиды
Твердые отходы				
Очень низкоактивные	до 10^7	до 10^3	до 10^2	до 10^1
Низкоактивные	от 10^7 до 10^8	от 10^3 до 10^4	от 10^2 до 10^3	от 10^1 до 10^2
Среднеактивные	от 10^8 до 10^{11}	от 10^4 до 10^7	от 10^3 до 10^6	от 10^2 до 10^5
Высокоактивные	более 10^{11}	более 10^7	более 10^6	более 10^5
Жидкие отходы				
Низкоактивные	до 10^4	до 10^3	до 10^2	до 10^1
Среднеактивные	от 10^4 до 10^8	от 10^3 до 10^7	от 10^2 до 10^6	от 10^1 до 10^5
Высокоактивные	более 10^8	более 10^7	более 10^6	более 10^5

В случае, когда по приведенным в табл. 2 характеристикам радионуклидов радиоактивные отходы относятся к разным категориям, для них устанавливается наиболее высокое из полученных значений категории отходов. Кроме того, твердые и жидкие радиоактивные отходы, содержащие природные радионуклиды, относятся к низкоактивным радиоактивным отходам [9].

Отдельное внимание стоит уделить классификации РАО МАГАТЭ. Идея данной классификации следующая: корректно изолировать (или вывести из-под контроля) радиоактивные отходы в зависимости от длительности жизни радионуклидов, которые в них содержатся. В рамках данной классификации выделяется 6 классов отходов [10]:

1. Освобожденные от контроля отходы (ОО; EW): отходы, которые соответствуют критериям вывода из-под регулирующего контроля, освобождения от регулиро-

- ющего контроля или изъятия из-под регулирующего контроля в целях радиоактивной защиты в соответствии с нормами МАГАТЭ по безопасности
2. Очень короткоживущие отходы (ОКЖО; VSLW): отходы, которые могут находиться на хранении для распада в течение ограниченного периода времени - до нескольких лет, а затем выводиться из-под регулирующего контроля в соответствии с порядком, утвержденным регулирующим органом, для неконтролируемого захоронения, использования или сброса. Этот класс включает в себя отходы, содержащие в основном радионуклиды с очень коротким периодом полураспада, часто используемые для исследовательских и медицинских целей.
 3. Очень низкоактивные отходы (ОНАО; VLLW): отходы, которые не обязательно соответствуют критериям очень короткоживущих отходов, но которые не требуют высокого уровня локализации и изоляции и, следовательно, подходят для захоронения на установках приповерхностного захоронения (траншеи с земляной засыпкой) с ограниченным регулирующим контролем. Такие захоронения типа траншей с земляной засыпкой могут также содержать другие опасные отходы. Типичные отходы, относимые к этому классу, включают почвы и щебень с низким уровнем активности. Концентрации долгоживущих радионуклидов, как правило, очень ограничены.
 4. Низкоактивные отходы (НАО; LLW): отходы, превышающие уровень вывода из-под регулирующего контроля, но с ограниченным объемом долгоживущих радионуклидов. Такие отходы требуют надежной изоляции и локализации на срок до нескольких сотен лет, они пригодны для захоронения в приповерхностных пунктах с инженерно-техническими барьерами. Этот класс охватывает очень широкий спектр отходов. Низкоактивные отходы могут включать в себя короткоживущие радионуклиды с более высокими уровнями активности, а также долгоживущие радионуклиды, но только при относительно низких уровнях активности.
 5. Среднеактивные отходы (САО; ILW): отходы, которые из-за своего содержания, особенно из-за содержания долгоживущих радионуклидов, требуют большей степени локализации и изоляции, чем это предусмотрено критериями приповерхностного захоронения. Тем не менее, они не нуждаются в обеспечении или же нуждаются только в ограниченном обеспечении отвода тепла в процессе хранения и захоронения. Среднеактивные отходы могут содержать долгоживущие радионуклиды, в частности, альфа-излучающие радионуклиды, которые не распадаются до уровня активности, приемлемой для приповерхностного захоронения.

ния в течение периода времени, в который можно рассчитывать на меры ведомственного контроля. Таким образом, отходы этого класса требуют захоронения на больших глубинах, порядка от десятков до нескольких сотен метров.

6. Высокоактивные отходы (ВАО; HLW): отходы с достаточно высокими уровнями активности, чтобы генерировать значительное количество тепла в процессе радиоактивного распада, или отходы с большим объемом долгоживущих радионуклидов, которые необходимо учитывать при проектировании установки для захоронения таких отходов. Общеизвестным вариантом захоронения высокоактивных отходов является захоронение в стабильных глубоких геологических формациях, обычно на глубине в несколько сотен или более метров от поверхности.

Необходимо подчеркнуть, что количественные значения допустимого содержания активности в отношении каждого значимого радионуклида определяются на основе оценки безопасности отдельных установок для захоронения [10].

1.2. Способы захоронения радиоактивных отходов

Окончательная изоляция РАО должна осуществляться на объектах приповерхностного (наземные и заглубленные) либо подземного типа (захоронения глубокого заложения, размещаемые на глубине нескольких сотен метров) в зависимости от периода потенциальной опасности и характеристик кондиционированных отходов¹ [11].

Пункт приповерхностного захоронения радиоактивных отходов – пункт захоронения радиоактивных отходов, включающий в себя сооружение, размещенное на одном уровне с поверхностью земли или на глубине до ста метров от поверхности земли [8].

Приповерхностные объекты изоляции РАО предназначены для захоронения твердых и отвержденных короткоживущих отходов² (с ограниченным содержанием долгоживущих радионуклидов), срок потенциальной опасности которых сопоставим с продолжительностью функционирования инженерных барьеров системы захоронения. Под сроком потенциальной опасности здесь понимается отрезок времени, по истечении которого удельная активность радионуклидов снизится до уровней, при которых отходы (как техногенный источник облучения) могут быть выведены из-под действия норм

¹ Кондиционированные отходы – РАО, пригодные для транспортировки, хранения и захоронения

² Короткоживущие отходы – радиоактивные отходы, содержащие радионуклиды с периодом полураспада менее 30 лет [8]

радиационной безопасности, сняты с контроля и подлежат неограниченному обращению.

Помимо инженерных барьеров системы захоронения (стенки контейнеров, матричные материалы, буферные материалы, строительные конструкции сооружений, изолирующие экраны и др.) используются естественные барьеры (горные породы, соляные формации, залежи глин), которые должны ограничивать контакт подземных вод с инженерными барьерами и распространение радионуклидов при нарушении целостности инженерных барьеров [11].

Глубинное захоронение РАО – захоронение РАО в сооружениях, размещаемых на глубине более ста метров от поверхности земли [12].

Так же, как и в случае приповерхностного захоронения РАО, успешное захоронение радиоактивных отходов в геологических формациях обеспечивается наличием совокупности инженерных и естественных барьеров, позволяющих минимизировать появление радионуклидов в среде обитания человека.

В глубоких геологических формациях захораниваются высокоактивные или долгоживущие радиоактивные альфа-содержащие отходы [13].

По результатам исследовательских работ, проводимых в рамках «Гламорского проекта» (Glamor project) и «проекта Микадо» (Micado project), целью которых было произвести вероятностную оценку возможного растворения захороненных ядерных отходов открытого и замкнутого топливных циклов в течение различных периодов времени, было выявлено, что скорость растворения контейнеров с остеклованными отходами (после переработки) и облицованных керамическим покрытием топливных стержней будет медленной: в размере от 0,02 до 5 мкг на квадратный метр в сутки; это означает, что время жизни стеклянной или керамической защиты топлива превышает миллион лет [14].

В результате решения первой задачи было установлено следующее:

1. преобладающий вклад в суммарную активность накопленных на территории России РАО принадлежит военной деятельности по наработке оружейного плутония;
2. РАО классифицируются по многим признакам, основными из которых являются активность и период полураспада радионуклидов, в них содержащихся. Стоит

отметить, что отдельных классификаций РАО по тепловыделению и объему не существует.

3. в настоящее время существует 2 способа захоронения РАО: приповерхностный и глубинный. Приповерхностный способ предназначен для захоронения твердых и отвержденных короткоживущих отходов на глубинах до 100 м, второй – для захоронения высокоактивных или долгоживущих радиоактивных альфа-содержащих отходов на глубинах более 100 м от поверхности земли.

1.3. Захоронение радиоактивных отходов за рубежом

Объемы накопленных РАО в различных странах мира и существующие подходы к их окончательной изоляции представлены в таблице 3.

Таблица 3. Объемы и пункты захоронения РАО за рубежом (по [15-18])

Страна	Объем накопленных РАО (без учета ОЯТ), тыс. м ³	Название пункта захоронения	Способ захоронения	Текущее состояние пункта захоронения
Австралия	4,5	не определено (поиск площадки)	приповерхностный	планируемая дата ввода в эксплуатацию: начало 2020-х гг.
Бельгия	16,6	Dessel	приповерхностный	планируемая дата ввода в эксплуатацию: 2016 г., однако информация о начале эксплуатации отсутствует
		не определено (поиск площадки)	глубинный, бум-ская глина	планируемая дата ввода в эксплуатацию: 2035 г.
Великобритания	ОНАО 2800 НАО 1400 САО 290 ВАО 1,1 <u>Всего: 4500</u>	Дригт (6 км от Селлафилда)	приповерхностный	в эксплуатации
		Лиллихолл		
		Кингсклиф		
		Даунрей		

		не определено (поиск пло- щадки)	глубинный	планируемая дата ввода в эксплуатацию: 2040 г.
Венгрия	39	Püspökszilágy, Пешт	приповерхностный	эксплуатация в период с 1977 по 2012 г.
		Bátaárati, Тольна	глубинный, гранит	в эксплуатации с 2012 г.
		не определено (поиск пло- щадки)	глубинный, глина	не определено
Германия	114	Ассе II	глубинный, соля- ная шахта	в 1988 г. захо- ронение отхо- дов было пре- кращено (про- никновение грунтовых вод)
		Морслебен	глубинный, соля- ная шахта	в 1998 г. захо- ронение отхо- дов было пре- кращено
		Конрад	глубинный, глина	планируемая дата ввода в эксплуатацию: 2022 г.
		Горлебен	глубинный, соля- ная шахта	не определено
Нидерланды	11	не определено (поиск пло- щадки)	не определено	не определено
Испания	161	Эль Кабрил	приповерхностный	в эксплуатации с 1992 г.
		не определено (поиск пло- щадки)	глубинный	не определено
Канада	HAO 2400 CAO 33	Кинкардин	глубинный, из- вестняк	планируемая дата ввода в эксплуатацию: 2019 г.
США	HAO 109000 HAO 3500 <u>Всего: 112500</u>	WIPP, Нью- Мексико	глубинный, соля- ная шахта	в эксплуатации с 1999 г.
		Якка-Маунтин	глубинный, туф	не определено
Финляндия	HAO и CAO 10	Ловииса	глубинный, гранит	в эксплуатации
		Олкилуото	приповерхностный (до 95 м.), тоналит	

		ONKALO	глубинный, гранит/гнейс	планируемая дата ввода в эксплуатацию: 2022 г.
Франция	ОНАО 360 НАО и САО 960 ВАО 3 <u>Всего: 1300</u>	Манш	приповерхностный	эксплуатация в период с 1969 по 1994 г.
		Об	приповерхностный	в эксплуатации с 1992 г.
		Морвилье	приповерхностный	в эксплуатации с 2003 г.
		Cigéo, Мез/От-Марн	глубинный, глины	планируемая дата ввода в эксплуатацию: 2025 г.
Швейцария	8	Zürcher Nordost	глубинный, опалиновая глина/глинистый известняк	планируемая дата ввода в эксплуатацию: 2050 г.
		Jura-Ost	глубинный, опалиновая глина	не определено
Швеция	НАО и САО 170	SFR, АЭС Форсмарк	приповерхностный, кристаллические породы	в эксплуатации с 1988 г.
		SFL	глубинный, кристаллические породы	планируемая дата ввода в эксплуатацию: 2045 г.
Чехия	9	Хостим	приповерхностный	эксплуатация в период с 1959 по 1997 год
		Ричард	приповерхностный	в эксплуатации с 1964 г.
		Братислава	приповерхностный	в эксплуатации с 1972 г.
		Дукованы	приповерхностный	в эксплуатации с 1995 г.
		не определено (поиск площадки)	глубинный, гранит/гнейс	не определено
Япония	захоронено более 50 тыс. ОНАО и НАО	Роккашо	приповерхностный	в эксплуатации с 1992 г.
		не определено (поиск площадки)	глубинный	не определено

Исходя из данных, приведенных в таблице выше, следует выделить 3 основных момента, касающихся объемов и подходов к захоронению РАО в различных странах:

1. В четырех странах объемы накопленных отходов превышают 1 млн. м³: Великобритании, Канаде, США и Франции. Причем только США имеют объем РАО, превышающий 100 млн. м³;
2. Наиболее распространенный способ захоронения РАО – приповерхностный;
3. Способ глубинного захоронения реализован только в четырех странах:
 - 1) Венгрии (объект Bataarati, вмещающая порода – гранит, в эксплуатации);
 - 2) Германии (объекты Ассе II и Морслебен, находящиеся в соляных пещерах, выведены из эксплуатации в связи с проникновением грунтовых вод);
 - 3) США (объект WIPP, соляная шахта, в эксплуатации);
 - 4) Финляндии (объект Ловииса, вмещающая порода – гранит, в эксплуатации).

Помимо данных, приведенных в таблице 3, можно предположить, что объемы образованных радиоактивных отходов в Китае достаточно велики: в данный момент на территории Китая находится 37 действующих ядерных реакторов суммарной мощностью более 32,4 ГВт [19]; кроме этого, КНР входит в число стран, обладающих ядерным оружием.

Достоверные оценки накопленных объемов РАО в Индии, Республике Корея и Израиле отсутствуют.

1.4. Захоронение радиоактивных отходов на территории

Российской Федерации

По данным годового отчета Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» за 2015 год, объем накопленных РАО к 31 декабря 2015 года составил 560 млн. м³, что почти в 5 раз превышает объем РАО, накопленный в США [20].

Федеральный закон от 11 июля 2011 года N 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» гласит, что радиоактивные отходы, за исключением короткоживущих радиоактивных отходов, удельная активность которых в результате распада радионуклидов за время хранения может быть снижена до уровня, при котором такие отходы перестают быть радиоактивными отходами, подлежат обязательному захоронению в пунктах захоронения радиоактивных отходов.

В настоящее время преобладающее количество радиоактивных отходов на территории Российской Федерации продолжает храниться; существует 4 пункта окончательной изоляции РАО, краткая характеристика которых представлена в таблице 4.

Таблица 4. Пункты захоронения РАО на территории РФ (по [21-23])

Название пункта захоронения	Объем захороненных РАО, м ³	Способ и глубина захоронения	Текущее состояние пункта захоронения
Димитровградский Научно-исследовательский институт атомных реакторов (НИИАР), г. Димитровград, Ульяновская обл.	ЖРО ¹ 3,3 млн.	глубинный, пласты-коллекторы на глубине 1130-1550 м.	в эксплуатации с 1971 г.
Железногорский Горно-химический комбинат (ГХК), г. Железногорск, Красноярский край	ЖРО 6,5 млн.	глубинный, пласты-коллекторы на глубине 180-500 м.	в эксплуатации с 1967 г.
Северский Сибирский химический комбинат (СХК), г. Северск, Томская обл.	ЖРО 51,7 млн.	глубинный, пласты-коллекторы на глубине 270-386 м.	в эксплуатации с 1963 г.
Новоуральское Уральский электрохимический комбинат (УЭХК), г. Новоуральск, Свердловская обл.	НАО 10 тыс.	приповерхностный	в эксплуатации с 2016 г.

Все ПЗРО² привязаны к определенному предприятию; количество отходов, образованных на данном предприятии и захороненных в определенном ПЗРО, превышает количество «чужих» отходов.

По результатам наблюдений ФГУП «НО РАО» за состоянием ПЗРО «Димитровградский», «Железногорский» и «Северский» было установлено, что геологические и гидрогеологические условия размещения ЖРО обеспечивают их локализацию в уста-

¹ ЖРО – Жидкие радиоактивные отходы

² ПЗРО – Пункт захоронения радиоактивных отходов

новленных границах геологической среды в течение практически неограниченного периода времени и их эксплуатация может быть продолжена [21,22].

Необходимо отметить, что жидкие радиоактивные отходы, окончательно изолированные способом глубинного захоронения в пластах-коллекторах, не были отверждены (в случае с ЖРО – остеклованы), т.е. не были кондиционированы. П. 2 ст. 30 Федерального закона N 190-ФЗ гласит, что захоронение НАО и САО ЖРО в недрах в пределах горного отвода допустимо, однако отходы «должны быть приведены в соответствие с критериями приемлемости для их захоронения в указанных пунктах захоронения». В свою очередь, п. 5 ст. 56 Водного кодекса РФ запрещает захоронение радиоактивных веществ в водных объектах (в т. ч. в водоносных горизонтах), что и вовсе характеризует деятельность по закачке ЖРО в пласты-коллекторы, в качестве которых выступают водоносные горизонты, как незаконную.

Схема глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов данным способом изображена на рисунке 2.

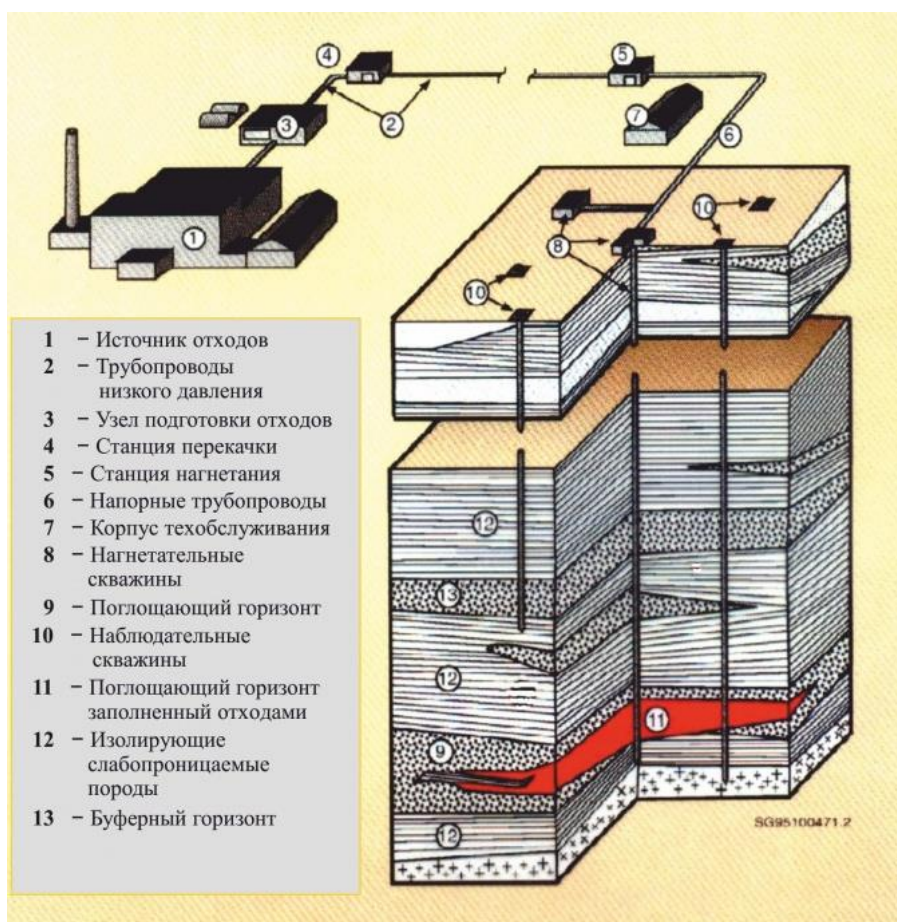


Рисунок 2. Принципиальная схема глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов [23]

Захоронение ЖРО в пластах-коллекторах происходит следующим образом: отходы, подготовленные к захоронению, направляют по трубопроводам от мест образования на полигоны захоронения к нагнетательным скважинам. Под давлением ЖРО поступают в ствол скважины и в поровое пространство пласта-коллектора, вытесняя пластовые воды и частично смешиваясь с ними. В результате взаимодействия отходов и подземных вод значительная часть отходов задерживается породами и практически не участвует в дальнейшей миграции.

Единственный пункт приповерхностного захоронения твердых среднеактивных короткоживущих и низкоактивных отходов расположен в Новоуральске, вместимость первой очереди которого составляет до 10 тыс. м³ без учета упаковки. Вторая очередь подразумевает захоронение около 5 тыс. м³ отходов. Суммарная емкость двух очередей с учетом упаковки РАО – 54 тыс. м³ [25,26]. Объект расположен на глубине 7 метров над толщей глины, выполняющей роль естественного барьера. Хранилище разделено на ячейки, которые заполняются контейнерами; внутри контейнеров – бочки с прессованными РАО. После заполнения каждая ячейка бетонируется.

Важнейшие проблемы, возникшие при обращении с РАО на территории Российской Федерации [27]:

- открытые поверхностные водоемы-хранилища жидких РАО, в том числе озеро «Старое болото» и Теченский каскад водоемов (ПО «Маяк»);
- подземные хранилища жидких РАО (Горно-химический комбинат, Сибирский химический комбинат, государственный научный центр «Научно-исследовательский институт атомных реакторов»), а также радиоактивная «линза» под озером Карачай (ПО «Маяк»);
- поверхностные железобетонные емкости-хранилища жидких высокоактивных отходов;
- приповерхностные хранилища твердых РАО, сооруженные без соблюдения современных нормативных требований безопасности.

Самое большое количество ЖРО образуется на ПО «Маяк»: около 600 тыс. м³ в год. Малую часть высокоактивных ЖРО «Маяка» остекловывают, остальные сливаются в водоемы-хранилища В-17(Старое болото) и Теченский каскад водоемов, состоящий из водоемов В-3, В-4, В-10, В-11 [27]. Озеро Карачай, в который также производился сброс ЖРО, было ликвидировано в ноябре 2015 года: дно для локализации донных от-

ложений было уложено бетонными блоками, а сам водоем – засыпан скальным грунтом [28].

На Горно-химическом комбинате (ГХК), Сибирском химическом комбинате (СХК) и в государственном научном центре «Научно-исследовательский институт атомных реакторов (НИИАР) нарабатывают около 772 тыс. м³ жидких радиоактивных отходов (400 тыс. м³, 320 тыс. м³ и 52 тыс. м³ соответственно), которые полностью закачиваются в недра (пласты-коллекторы) [27].

В настоящее время ФГУП «НО РАО» (Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами) планирует создание пунктов окончательной изоляции РАО в регионах, которые показаны на рисунке 3.

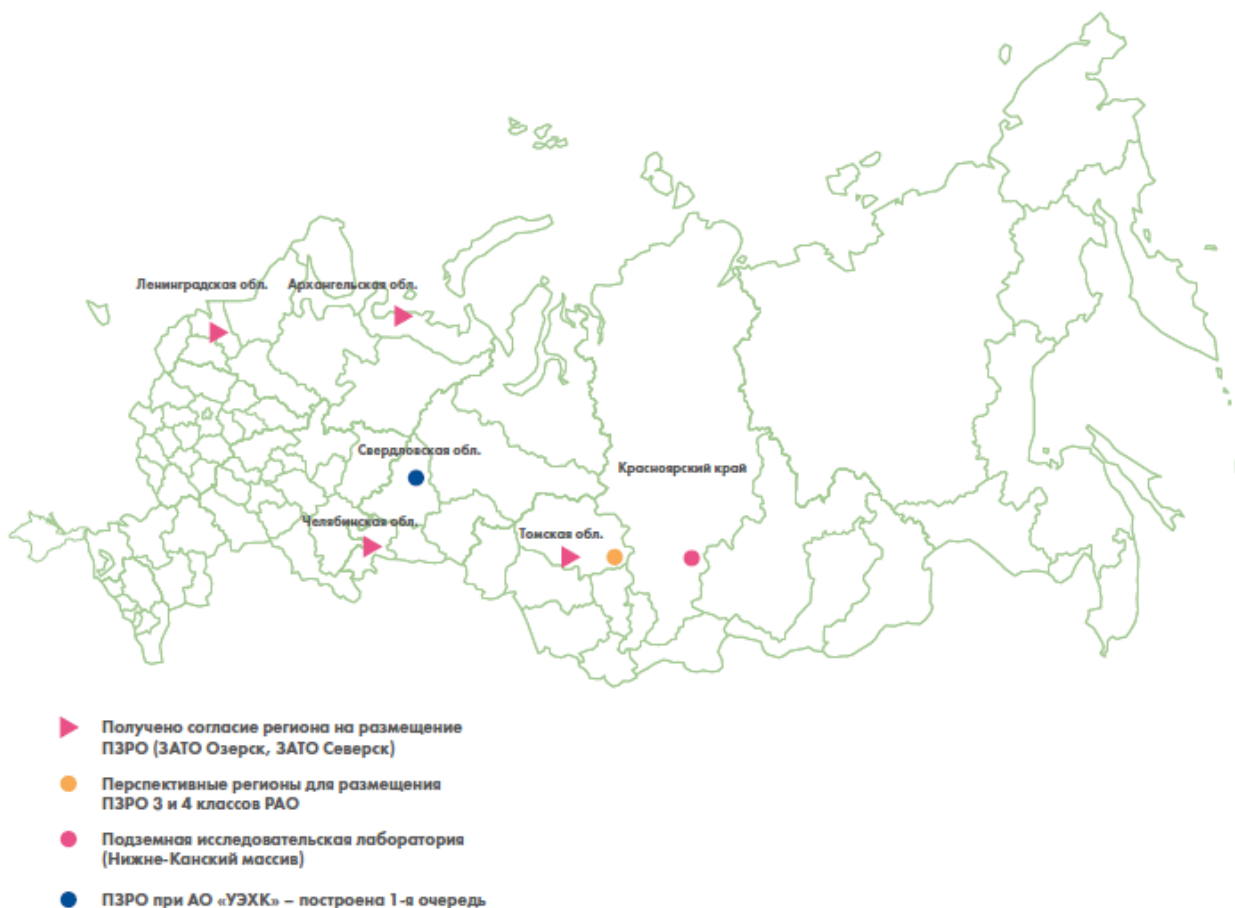


Рисунок 3. Размещение планируемых пунктов захоронения РАО [21]

В результате анализа сложившейся в нашей стране ситуации с захоронением радиоактивных отходов можно констатировать следующее: на территории России накоплен наибольший в мире объем РАО, который составляет 560 млн. м³; при этом лишь 11 % этого объема захоронено. Способ закачки в пласты-коллекторы, использованный для

захоронения отходов, противоречит Водному кодексу. Кроме того, хранение образованных на ПО «Маяк» ЖРО в водоемах-хранилищах также не соответствует законодательству РФ.

2. ГЛИНЫ КАК СРЕДА ДЛЯ ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Как уже было отмечено ранее, существующие и планируемые к созданию ПЗРО привязаны к определенному предприятию. Основные причины, объясняющие расположение пунктов окончательной изоляции РАО, следующие:

1. Транспортно-экономическая целесообразность: отсутствие затрат на транспортировку отходов на дальние дистанции;
2. Экологическая безопасность: минимизация рисков, связанных с попаданием радионуклидов в среду обитания человека при транспортировке РАО;
3. «Спокойствие» населения: главным и, в большинстве своем, единственным источником образования отходов, захораниваемых вблизи мест проживания населения, является градообразующее предприятие; количество отходов, образованных на данном предприятии и захороненных в определенном ПЗРО, превышает количество «чужих» отходов. К примеру, на слушаниях по материалам обоснования лицензии на сооружение 2-й очереди и на внесение изменений в лицензию на эксплуатацию 1-й очереди пункта захоронения радиоактивных отходов, проходивших в феврале 2017 г. в Новоуральске, представители НО РАО заявили, что процент внешних отходов не превысит 30% относительно отходов УЭХК [29].

Проблемы, связанные с созданием пункта и последующим захоронением в нем РАО приповерхностным способом в глинах, будут рассмотрены на примере участка предполагаемого строительства ПЗРО вблизи «ЛСК «Радон» в коренных отложениях глин Ленинградской области (Ломоносовский район).

2.1. Классификация и основные свойства глин

Глинистые породы, или пелиты, состоят в основном из частиц размером менее 0,01 мм, среди которых коллоидно-дисперсных минеральных образований размером менее 0,005 мм содержится более 30%. Они широко распространены на земной поверхности и составляют 50% общего объема осадочных пород [30]. Главные химические компоненты глин – SiO_2 (30-70%), Al_2O_3 (10-40%) и H_2O (5-10%); в подчинённых количествах присутствуют Fe_2O_3 (FeO), TiO_2 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , CO_2 , реже MnO , SO_3 ,

P_2O_5 . В состав глин входят главным образом каолинит, монотермит, монтмориллонит, галлуазит, гидрослюды, иногда палыгорскит [31].

По условиям образования глинистые породы подразделяются на две основные группы: 1) осадочные, возникшие в результате переноса и переотложения в области осадконакопления измененных выветриванием тонкодисперсных продуктов различных пород и минералов, а также в результате выпадения из растворов коллоидных частиц, и 2) остаточные (кора выветривания), возникшие в результате изменения различных пород на месте. В классификации глин большое значение имеют размеры слагающих их частиц (структурная классификация), минеральный состав, пластичность, степень уплотнения, размокания и другие характерные для них признаки [32].

Группы глинистых минералов по структурно-минералогическим признакам:

- группа каолинита;
- группа монтмориллонита;
- смешанная группа иллита и гидрослюд.

Группа каолинита представлена тремя полиморфными модификациями: каолинитом, диккитом и накритом. Химический состав чистого каолинита: SiO_2 – 46,5; Al_2O_3 – 39,5; H_2O – 14 %, примесными компонентами являются Fe_2O_3 , Mg, Ca, Na_2O , K_2O . Плотность каолинита 2,61-2,68 г/см³, твердость 2-2,5 (мягкий). Каолинит по сравнению с другими минералами глинистых пород имеет небольшую величину набухаемости и сравнительно небольшую обменную емкость (0,02-0,10 мг-экв/г), примерно одинаковую для катионов и анионов.

Первичные каолины являются продуктами разложения алюмосиликатов в зонах выветривания, в которых формируются площадные или гнездовые формы промышленных месторождений. Мощность залежей варьирует от 1-1,5 до более, чем 100 метров. Вторичные каолины образуются за счет размыва, переноса и последующего отложения первичных каолиновых пород. Мономинеральный каолинитовый состав часто имеют глины озерного происхождения. Обладающие высокой огнеупорностью каолиновые глины – основное сырье для различных производств, важнейшими из которых являются производство огнеупорных материалов, изготовление электрокерамики, использование в бумажной, пластмассовой, пищевой, фармацевтической и других отраслях хозяйства.

К группе монтмориллонита относятся монтмориллонит, сапонит, бейделлит и нонтронит. Состав монтмориллонита различается в зависимости от месторождения (в

%) : SiO_2 48-56, Al_2O_3 11-22, H_2O 12-24, Fe_2O_3 0-5, MgO 4-9, CaO 0,8-3,5. Плотность монтмориллонита варьирует от 1,7 до 2,7 г/см³, твердость 1-2 (мягкий). Содержание воды в монтмориллоните зависит от влажности окружающего воздуха: в насыщенной водяными парами среде он поглощает воду, в сухом воздухе – отдает. При нагреве в монтмориллоните происходят необратимые структурно-минералогические изменения, ухудшающие его первичные сорбционно-изолирующие свойства. По сравнению с другими глинистыми минералами монтмориллонит характеризуется высокой влагоемкостью. В монтмориллонитовых глинах содержится наибольшее среди глинистых минералов количество связанной воды, которая придает им высокую водонепроницаемость. Кроме этого, катионнообменная емкость монтмориллонита выше, чем у других глинистых минералов.

Монтмориллонит образуется преимущественно при выветривании основных изверженных пород в условиях щелочной среды. Многие монтмориллонитовые (бентонитовые) глины являются продуктом разложения вулканических пеплов, осевших в морских бассейнах. Бентонитовые глины являются основным компонентом естественных барьеров, создающих безопасные условия изоляции радиоактивных отходов.

Иллит – глинистый минерал со структурой слюды, но с дефицитом калия или слюды, в которой щелочи частично замещаются водой. Содержание SiO_2 в иллите достигает 50-55 %, Al_2O_3 – 25-33 %, H_2O – 8-9 %, а K_2O – 2-3 %. Плотность иллита 2,64-2,69 г/см³. Обладает низкой набухаемостью и незначительной катионообменной емкостью.

Иллит образуется в морских условиях из породообразующих алюмосиликатов при диагенезе, в зонах гидротермальных изменений пород. Необходимым условием образования иллита является наличие водной среды [33].

Основные свойства глинистых пород, позволяющие считать их перспективной средой для захоронения радиоактивных отходов:

- Водупорность;
- Поглощающая способность;
- Пластичность;
- Набухаемость;
- Стабильность.

По степени проницаемости глины относятся к водоупорным горным породам, т.е. не пропускают через себя свободную воду при гидравлических градиентах¹, существующих в природе. Скорость движения воды в глинистых породах крайне мала вследствие внутреннего сопротивления, создающегося малыми размерами пор, и заполненностью последних водно-коллоидными пленками. Величинами, характеризующими водопропускную способность горной породы, являются коэффициент фильтрации и коэффициент проницаемости. Отличием между ними служит то обстоятельство, что коэффициент фильтрации учитывает свойства флюида и горной породы, в то время как коэффициент проницаемости – только свойства породы. Классификация пород по проницаемости приведена в таблице 5.

Таблица 5. Классификация пород по проницаемости [31]

Класс	Породы	K_f , м/с	K_p , м ²
Очень хорошо проницаемые	Крупные галечники и гравий, чистые или частично заполненные крупнозернистым песком, сильнозакарстованные известняки, сильнотрещиноватые породы	$1,2 \times 10^{-3}$ - $1,2 \times 10^{-2}$ и более	$1,2 \times 10^{-10}$ - $1,2 \times 10^{-9}$ и более
Хорошо проницаемые	Галечники и гравий, заполненные крупнозернистым песком, крупно- и среднезернистые пески, трещиноватые породы	$1,2 \times 10^{-3}$ - $1,2 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-10}$ - $1,2 \times 10^{-11}$
Проницаемые	Галечники и гравий, заполненные мелкозернистыми и глинистыми песками, средне- и мелкозернистые пески, мало-трещиноватые породы, бурые и каменные угли	$1,2 \times 10^{-4}$ - $1,2 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-11}$ - $1,2 \times 10^{-12}$

¹ Гидравлический (напорный) градиент — величина потерь напора на единицу длины пути фильтрации

Слабопроницаемые	Мелкозернистые пески, супеси, песчаники с глинистым цементом, антрациты, слаботрещиноватые породы	$1,2 \times 10^{-5} - 1,2 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-12} - 1,2 \times 10^{-13}$
Весьма слабопроницаемые	Суглинки, песчаные глины, глинистые сланцы, очень слаботрещиноватые породы	$1,2 \times 10^{-6} - 1,2 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-13} - 1,2 \times 10^{-15}$
Почти непроницаемые	Плотные глины, мергели, аргиллиты, массивные породы	менее $1,2 \times 10^{-8}$	менее $1,2 \times 10^{-15}$

, где K_f – коэффициент фильтрации, численно равный линейной скорости фильтрации определенного флюида при гидравлическом градиенте, равном единице; K_p – коэффициент проницаемости, численно равный объемному расходу флюида с динамической вязкостью, равной единице, проходящего через единицу площади сечения при единичном перепаде давления на единицу пути фильтрации.

Из таблицы видно, что плотные глины, коэффициенты фильтрации и проницаемости которых равны менее $1,2 \times 10^{-8}$ м/с и менее $1,2 \times 10^{-15}$ м² соответственно, относятся к классу почти непроницаемых горных пород. Однако необходимо учесть, что значения коэффициента фильтрации получены для случая проникновения пресной воды через горные породы, в то время как присутствие соляных растворов в глинах оказывает отрицательное влияние на их свойства [33].

Глины обладают высокой поглощающей способностью, численной характеристикой которой является коэффициент распределения K_d , также называемый коэффициентом сорбции или константой распределения. Он рассчитывается как отношение концентрации радионуклидов, поглощенных твердой фазой, к концентрации радионуклидов в растворе после установления равновесия. Значения коэффициентов распре-

деления нижнекембрийских и котлинских глин Ленинградской области для некоторых радионуклидов приведены в таблице 6. Очевидно, что котлинские глины обладают лучшей сорбционной способностью по отношению к ^{137}Cs , чем глины нижнего кембрия

Таблица 6. Коэффициенты распределения радионуклидов для нижнекембрийских и котлинских глин Ленинградской области (по [34])

Название глин	Радионуклид	K_d , см ³ /г
Нижнекембрийские	^{90}Sr	$\sim 10^2$
	^{137}Cs	$\sim 10^2$
	^{239}Pu	$\sim 10^4$
	^{241}Am	$\sim 10^3$
Котлинские	^{90}Sr	32-56
	^{137}Cs	4000-8000
	^{60}Co	600-1600
	^{239}Pu и ^{240}Pu	4000-25000

Поглощающая способность глин связана с ее высокой удельной поверхностью – характеристикой размеров внутренних полостей тела, которая выражается отношением суммарной поверхности тела к его массе или объему. Значения удельной поверхности глин достигает первых сотен м²/г. Она обратно пропорциональна размеру частиц дисперсной фазы: чем меньше размер частиц, тем больше удельная поверхность породы [35]. От величины удельной поверхности зависят поглотительная способность адсорбентов и свойства фильтрующих материалов.

Набухаемость – способность глинистых пород увеличивать объем в процессе взаимодействия с водой или водными растворами. При набухании увеличивается влажность и объем породы. Способность глин к набуханию характеризуется влажностью набухания (W_n) и давлением набухания (P_n). Наибольшим набуханием обладают глинистые породы, в составе которых имеются глинистые минералы с подвижной кристаллической структурой (например, монтмориллонит), наименьшим – минералы с более жесткой кристаллической структурой (каолинит) [36].

В результате изучения классификаций и основных свойств глинистых пород удалось установить, что:

1. Глинистые породы по проницаемости относятся к весьма слабопроницаемым и почти непроницаемым горным породам ($K_f < 1,2 \times 10^{-6}$ м/с, $K_n < 1,2 \times 10^{-13}$ м²);

2. Свойствами глинистых пород, позволяющими считать их перспективной средой для захоронения радиоактивных отходов, являются: водоупорность, поглощающая способность и высокая удельная поверхность, пластичность, набухаемость, стабильность.

2.2. Характеристика территории, планируемой для размещения пункта приповерхностного захоронения радиоактивных отходов в отложениях глин Ленинградской области

Приоритетной площадкой для размещения ПЗРО по результатам ОВОС, проведенной специалистами ФГУП «РосРАО» и ОАО «ГИ «ВНИПИЭТ» в 2012 г., стала площадка вблизи ЛСК «Радон», расположенная на территории Муниципального образования «Сосновоборский городской округ», в 6 км к юго-западу от г. Сосновый Бор и в 1,5 км от побережья Копорской губы Финского залива. Размещение ПЗРО предполагается в районе промышленной площадки Ленинградского отделения филиала «Северо-Западный территориальный округ» ФГУП «РосРАО» [37] (рис. 4).

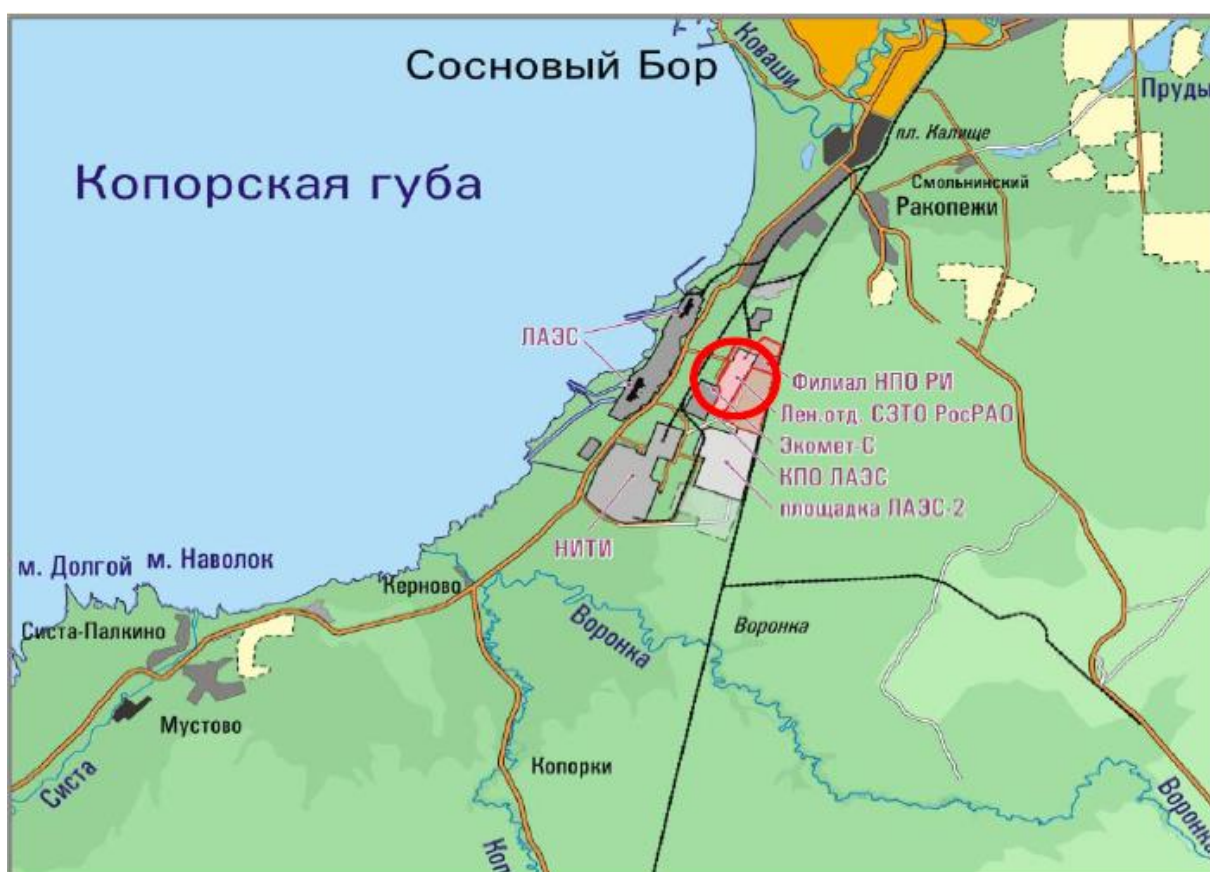


Рисунок 4. Место расположения приоритетной площадки для размещения ПЗРО [37]

Вблизи предполагаемого места размещения ПЗРО расположены площадки строительной базы ЛАЭС-2, филиал Радиевого института им. В.Г. Хлопина, АО «Экомет-С» и НИТИ им. А.П. Александрова.

Предполагаемый пункт захоронения предназначен для окончательной изоляции низко- и среднеактивных РАО приповерхностным способом в толще глин на глубине 60-70 м. Фактически это подземный туннель диаметром 14,2 м и длиной рабочей части 1000 м [38] (рис. 5).

ПЗРО рассчитан на прием 50 тыс. м³ отходов в течение шести-десяти лет эксплуатации с возможностью последующего расширения. Основными предполагаемые поставщики отходов – Ленинградское отделение филиала «Северо-Западный территориальный округ» ФГУП «РосРАО», ЛАЭС-1 и ЛАЭС-2. Утверждается, что постэксплуатационный период ПЗРО составит не менее 500 лет [38].

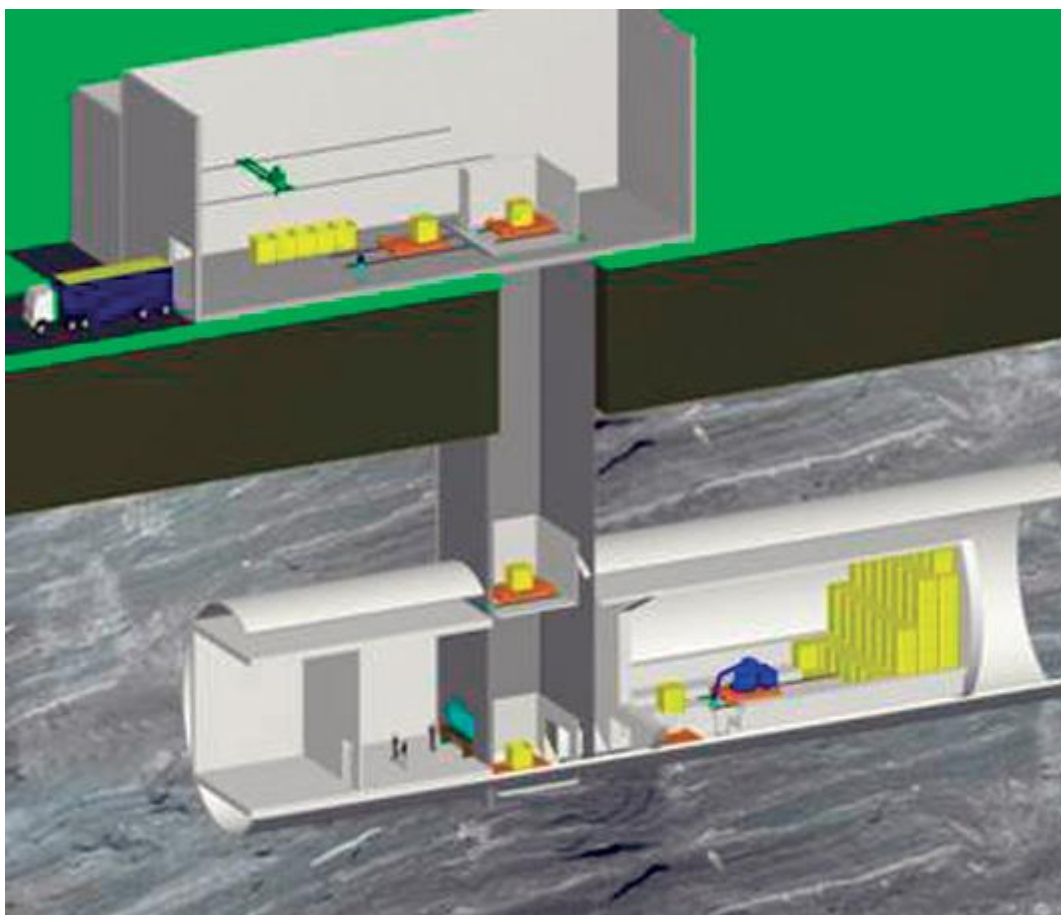


Рисунок 5. Конструкция загрузочной шахты заглубленного ПЗРО [38]

Важнейшими с точки зрения безопасности при создании и последующей эксплуатации подземного ПЗРО являются гидрогеологические условия региона, где планируется размещение площадки для захоронения.

2.3. Геологическое строение перспективного участка для размещения пункта захоронения радиоактивных отходов

Перспективный участок для строительства приповерхностного ПЗРО в толще глин расположен на северо-западном окончании Русской плиты (рис. 6).

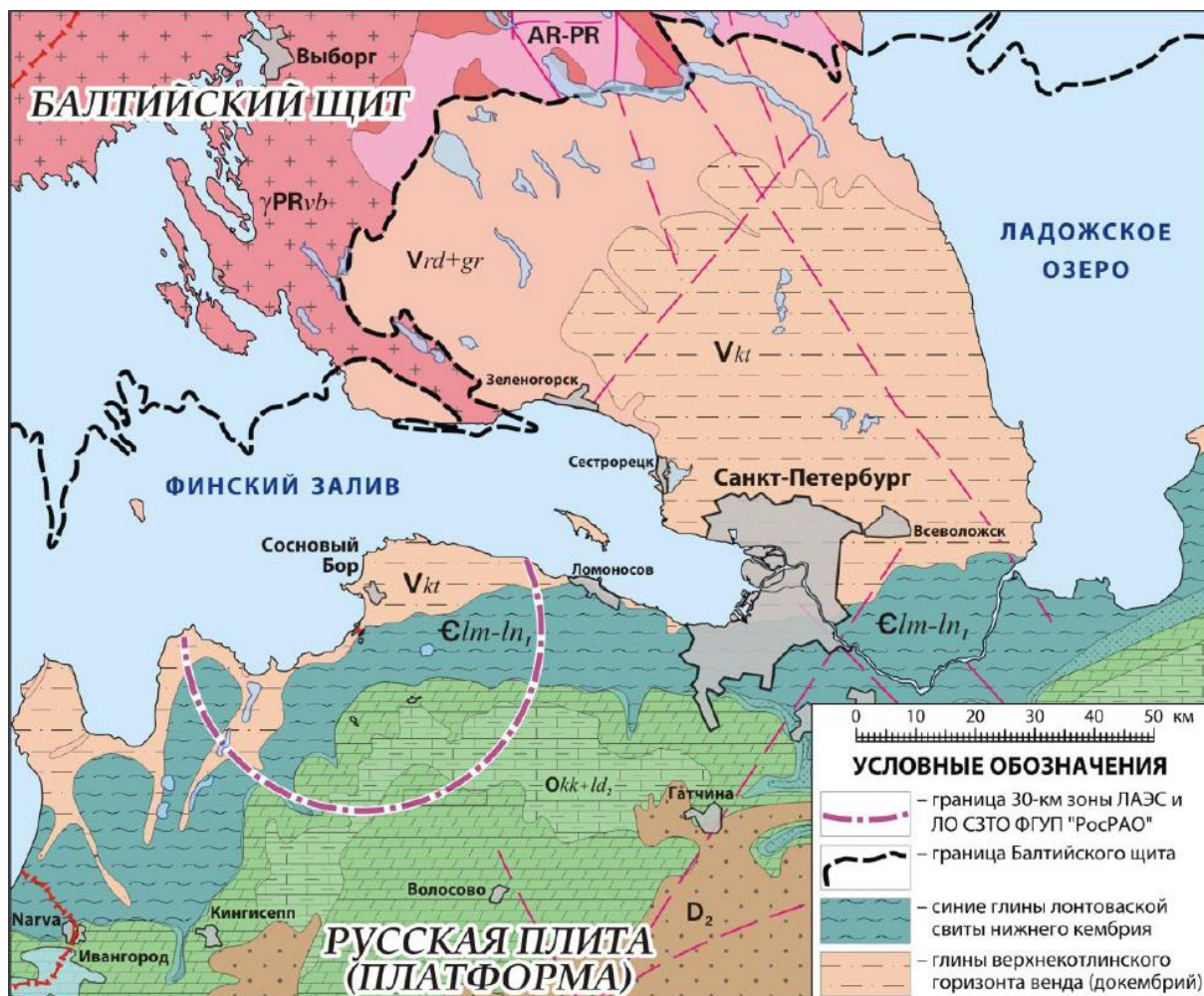


Рисунок 6. Зона сочленения Балтийского щита и Русской плиты на северо-западе Ленинградской области [33]

По результатам исследований, проведенных ГГП «Севзапгеология», в рассматриваемом регионе проходит полоса разломов восток-северо-восточного направления, имеющая наибольшую современную активность [39] (рис. 7).

Активный разлом – разлом земной коры, по которому в историческое время или в голоцене (последние 10 тыс. лет) происходили смещения либо локализовались очаги землетрясений [40].

В соответствии картой общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2016, максимальная интенсивность сейсмических сотрясений в районе предполагаемого места размещения ПЗРО составляет 6 баллов по принятой в

России шкале землетрясений MSK-64 (1 балл – неощутимое землетрясение, 12 баллов – изменение рельефа).

Вместе с тем, приоритетная площадка строительства ПЗРО находится в пределах наиболее ослабленного, тектонически активного участка территории, отличающегося повышенной проницаемостью пород фундамента и осадочного чехла, что также отражено на рисунке 7.

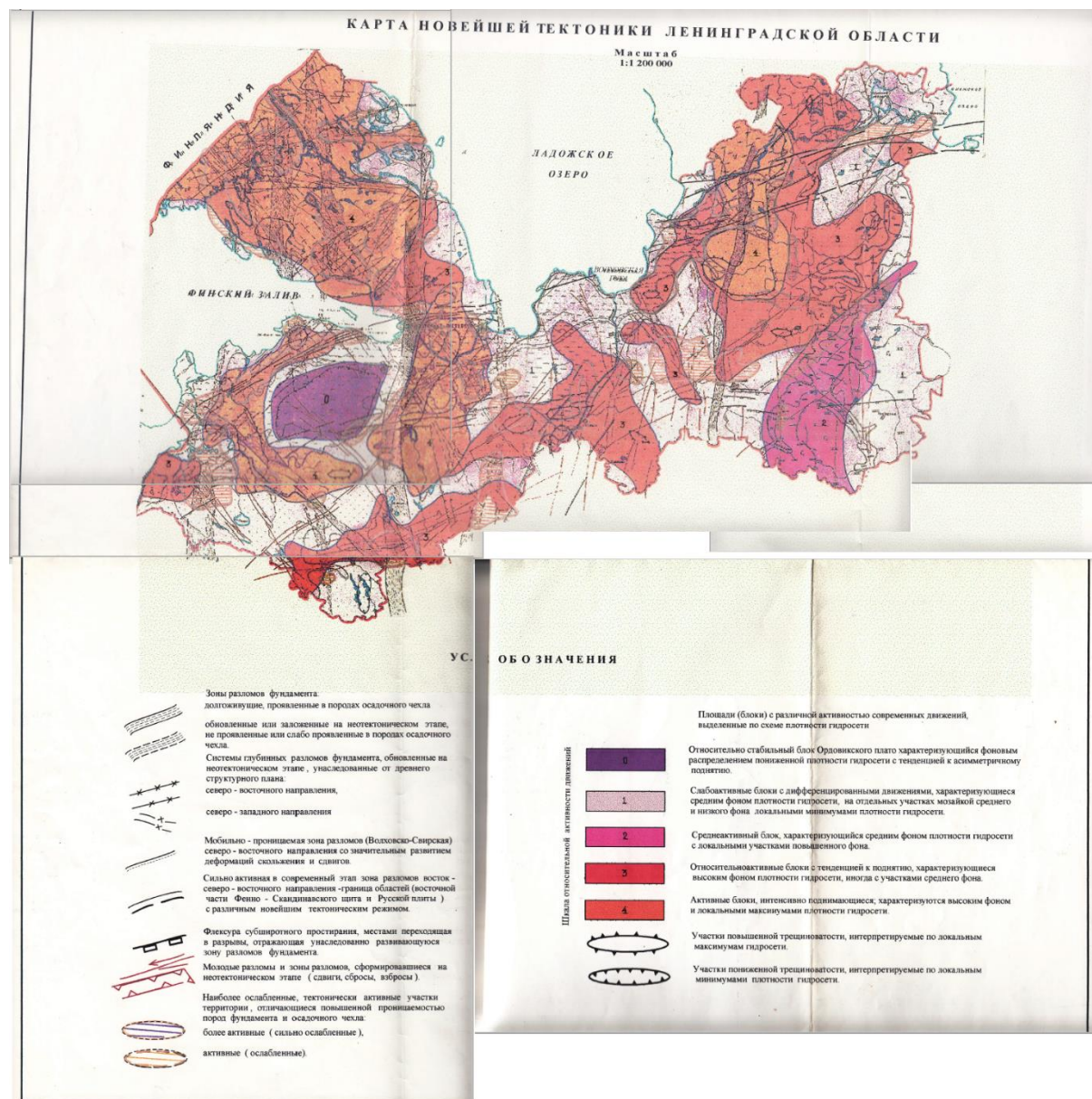
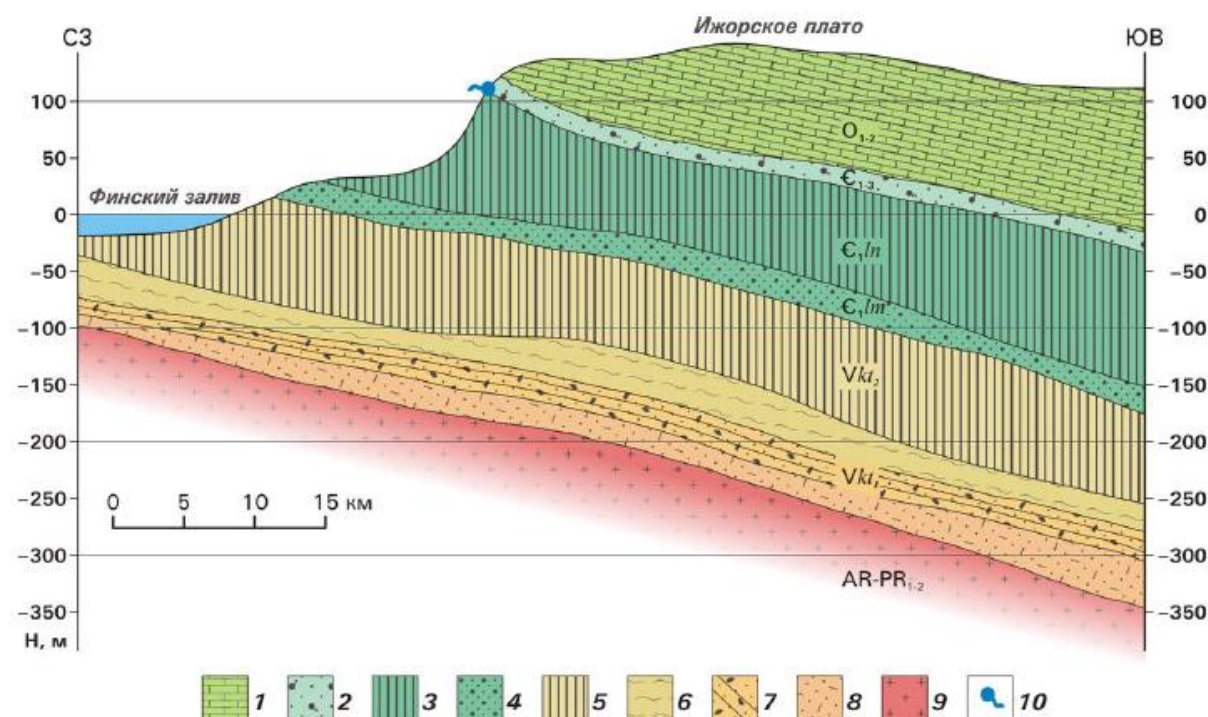


Рисунок 7. Карта новейшей тектоники Ленинградской области (Б.Г.Дверницкий, В.А.Ядута, 1999)

Участок планируемого размещения приповерхностного ПЗРО расположен в районе Предглинтовой низменности между береговой линией Копорской губы Финского залива и Балтийско-Ладожским глинтом. Дочетвертичные осадочные отложения на

данном участке представлены породами нижнего венда и верхнего кембрия [37] (рис. 8).

Как уже отмечалось ранее, предполагаемая глубина захоронения РАО на данном участке составляет 60-70 м, где залегает верхнекотлинский водоупорный горизонт, представленный глинами.



1 – водоносный горизонт ордовикских отложений; 2 – водоносный горизонт верхнего-нижнего кембрия; 3 – лонтоваская свита нижнего кембрия (водоупор); 4 – ломоносовский водоносный горизонт; 5 – верхнекотлинский горизонт венда (водоупор); 6 – перекрывающие водоупоры котлинского водоносного комплекса; 7 – нижнекотлинский водоносный горизонт; 8 – стрельнинский водоносный горизонт; 9 – архей-протерозойский водоносный горизонт; 10 – источники.

Рисунок 8. Схематический геологический разрез по линии Сосновый Бор-Волосово [33]

Помимо самого верхнекотлинского горизонта, особый интерес представляют водоносные горизонты, для которых он (верхнекотлинский горизонт) является нижним или верхним водоупором: такими являются нижнекембрийский (ломоносовский) водоносный горизонт и вендский водоносный комплекс.

Нижнекембрийский (ломоносовский) водоносный горизонт выходит узкой полосой на южном побережье Финского залива и Ладожского озера. Горизонт сложен песчаниками и алевролитами, иногда переслаивающимися с глинами. Глубина залегания

ния горизонта, в основном, лежит в пределах от 10 до 155 м. Мощность горизонта варьируется от 10 м на севере до 35 м на юге и юго-востоке [41].

Воды горизонта трещинно-пластовые, напорные. Водообильность из-за глинистой составляющей неравномерная, в целом умеренная [41]. Наибольшие значения коэффициента водопроницаемости¹ наблюдаются на западных окраинах распространения горизонта (Сланцы, Ивангород) и составляют 100-140 м²/сут. В центральной части (Кингисепп, п. Котлы) они составляют 50-100 м²/сут., а к югу и востоку (в сторону Соснового Бора) – менее 50 м²/сут. Максимальная водопроницаемость в районе ЛАЭС 1,5-9,0 м³/сут, а дебит скважин – 17-35 м³/сут. Необходимо подчеркнуть, что воды Ломоносовского горизонта на севере Ломоносовского района разрешено использовать исключительно для решения частных проблем водопотребителей с изъятием до 100 м³ в сутки [33].

Минерализация воды увеличивается в восточном направлении по простиранию и в южном по падению слоев. На западе залегают пресные (до 1 г/дм³) гидрокарбонатные кальциево-натриевые или натриевые воды, к югу и востоку переходят в хлоридно-карбонатные и гидрокарбонатно-хлоридные натриевые с минерализацией 1-3 г/дм³ [41].

В предглинтовой низменности на южном побережье Финского залива в вендском водоносном комплексе, подстилаемом кристаллическими породами фундамента, выделяются два водоносных горизонта: нижний (стрельнинский) и верхний гдовский. Горизонты разделены толщей глин мощностью 5-20 м. Основное движение вод происходит с юго-востока на северо-запад в область дренажа, которой является Финский залив [33]. Комплекс сложен переслаивающимися пачками песчаников, песков, алевролитов и глин. Для комплекса характерно преобладание песчаников в нижней части и увеличение глин и алевролитов в верхней. Средняя глубина залегания лежит в пределах от 130 до 240 м. Мощность комплекса на участках залегания под четвертичными отложениями изменчива – от 10 до 80 м, под котлинскими глинами довольно постоянна и составляет 80-95 м [41].

Воды комплекса повсеместно напорные. Водообильность комплекса, в целом, значительная. Водопроницаемость пород варьируется: от 50 до 500 м²/сут [33].

¹ Коэффициент водопроницаемости – показатель фильтрационной способности горной породы, равный произведению коэффициента фильтрации на мощность водоносного пласта. Характеризует способность водоносного пласта шириной 1 м фильтровать воду в единицу времени при напорном градиенте, равном 1

Подземные воды в пределах Карельского перешейка имеют гидрокарбонатный натриево-кальциевый состав с минерализацией 0,1-0,4 г/дм³; ближе к границе минерализованных вод их состав меняется на гидрокарбонатно-хлоридный натриевый с минерализацией 0,5-0,8 г/дм³ [33].

Использование вод комплекса определяется прежде всего их гидрохимическими особенностями. Ультрапресные (<0,2 г/дм³) и пресные воды добываются для централизованного водоснабжения Курортного района Санкт-Петербурга, предприятий и частного водоснабжения индивидуальных коттеджей и дачных хозяйств Карельского перешейка. Утвержденные запасы подземных вод этих месторождений составляют 13,7 тыс. м³/сут. Кроме этого, минерализованные воды вендского водоносного комплекса используются в качестве промышленных вод (извлечение ценных элементов) и для выпуска бутылированной воды [42].

Котлинский водоупорный горизонт, представленный толщей глин, развит практически на всей территории Ленинградской области. Мощность пласта находится в интервале от 50 до 130 м [33]. Пласт глин защищает нижележащий водоносный (нижнекотлинский) горизонт от инфильтрационных вод.

По данным исследований [43], вендские глины котлинского яруса характеризуются как весьма слабо проницаемые породы, но только при условии отсутствия трещинной фильтрации в массиве: значения коэффициента фильтрации поперек напластования находились в диапазоне $0,5-1,4 \times 10^{-6}$ м/сут ($5,8 \times 10^{-12}-1,6 \times 10^{-11}$ м/с), вдоль напластования – $0,4-1,9 \times 10^{-7}$ м/сут ($4,6 \times 10^{-11}-2,2 \times 10^{-10}$ м/с). Однако, по результатам исследований СПГГИ, верхнекотлинский водоупорный горизонт – трещиновато-блочная среда, присутствие межблочных трещин в которой повышает проницаемость глин на 2-3 порядка [39]. Наибольшая степень проницаемости верхнекотлинской толщи наблюдается в пределах зон тектонических разломов, а также в верхней части разреза коренных глин, где отмечается преобразование и дезинтеграция толщи за счет процессов выветривания и действия ледников [44].

Трещиновато-блочную среду по аналогии с нижнекембрийскими «синими» глинами можно охарактеризовать следующим образом: монолитные блоки глины, между которых есть как вертикальные, так и горизонтальные трещины. Приблизительная длина стороны такого блока на глубинах до 30 м составляет 30 см. С глубиной размер монолитных блоков увеличивается. Отсюда можно сделать вывод, что трещиноватость глин, залегающих глубже 30 м, ниже, чем у вышележащих слоев [39].

Кроме этого, исследования [43] позволили выделить две зоны котлинских глин:

1. верхнюю – относительно разуплотненных глин (от кровли глинистой толщи до глубин 50-60 м);
2. нижнюю – относительно прочных глин (глубже 50-60 м).

Увеличение прочности пород и уменьшение их сжимаемости¹ связано с возрастанием степени песчанистости с глубиной и увеличением напряжений (давлений на породу) в толще глин.

В результате решения четвертой задачи следует отметить основные моменты, характеризующие геологическое строение участка, перспективного для строительства приповерхностного ПЗРО:

1. В регионе, где находится площадка, проходит полоса активных разломов. Однако, по мнению В.Г. Румынина, вероятность сколько-нибудь значимого землетрясения в этих местах – раз в 300 тысяч лет [45];
2. Максимальная интенсивность возможных сейсмических сотрясений в районе предполагаемого места размещения ПЗРО составляет 6 баллов;
3. Верхнекотлинский водоупорный горизонт граничит с ломоносовским водоносным горизонтом сверху и вендским водоносным комплексом снизу. Разгрузка вод вендского водоносного комплекса происходит в Финский залив;
4. Вследствие того, что рассматриваемая толща котлинских глин является трещиновато-блочная средой, ее фильтрационная проницаемость характеризуется значениями K_f , лежащими в интервале 1×10^{-3} - 1×10^{-5} м/сут, что характеризует данные глинистые породы как весьма слабо проницаемые.

2.4. Оценка экологических последствий возможной радиационной аварии при проникновении радионуклидов из пункта захоронения радиоактивных отходов в вендский водоносный комплекс

Как уже отмечалось ранее, основным предполагаемым поставщиком отходов в ПЗРО будет выступать Ленинградское отделение филиала «Северо-Западный территориальный округ» ФГУП «РосРАО», где хранится более 67 тыс. РАО активностью около $1,99 \times 10^{16}$ Бк [46]. В составе отходов преобладают радионуклиды ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{60}Co (их суммарная активность достигает 95% от общей активности РАО) [47].

¹ Сжимаемость горных пород – способность горных пород изменять свой объем под воздействием всестороннего давления

В материалах ОВОС при размещении приповерхностного ПЗРО в толще верхнекотлинских глин было выделено 2 возможных сценария развития аварии при высвобождении радионуклидов из ПЗРО.

Сценарий 1: при деградации защитных свойств инженерных барьеров, т.е. контейнеров, срок службы которых не превышает 300 лет, глинистая толща станет единственным защитным барьером на пути миграции радионуклидов. Скорость проникновения радионуклидов при данном сценарии зависит от диффузионных свойств и адсорбционной способности глинистой породы. Кроме того, для короткоживущих радионуклидов глубина проникновения загрязнения также ограничена периодом полураспада ($T_{1/2}$) [37].

В результате расчетов по первому сценарию, выполненных для трех радионуклидов – ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{239}Pu , максимальная глубина проникновения составила 3,2 м по ^{90}Sr (табл. 7, рис. 9).

Таблица 7. Расчетные параметры для сценария 1 [37]

Параметр	^{90}Sr	^{137}Cs	^{239}Pu
$K_d \text{ min, см}^3/\text{г}$	36,0	2000	10000
$D_p \text{ max, м}^2/\text{с}^*$	$1,74 \times 10^{-9}$	$1,04 \times 10^{-10}$	$3,85 \times 10^{-12}$
$\lambda, \text{сут}^{-1}$ ($T_{1/2}$)	$6,52 \times 10^{-5}$ (29,12 лет)	$6,33 \times 10^{-5}$ (30,00 лет)	$7,89 \times 10^{-8}$ (24065,51 лет)
Суммарная активность ПЗРО, Бк	$3,1 \times 10^{16}$	$5,7 \times 10^{16}$	$4,4 \times 10^{12}$
Максимальная глубина проникновения, м	3,2	0,15	0,09
Время полной реабилитации, года**	1500	1700	—***

* – поровой коэффициент диффузии;

** – время, когда в любой точке ореола загрязнения концентрация радионуклида будет меньше 0,1 уровня вмешательства (УВ), т.е. уровня радиационного фактора, при превышении которого следует проводить определенные защитные мероприятия. УВ для: ^{90}Sr – 0,49 Бк/л, ^{137}Cs – 0,11 Бк/л, ^{239}Pu – 0,055 Бк/л [48];

*** – прогноз на 10 тыс. лет.

Расчеты были выполнены при ρ (плотность) = 2000 кг/м³, n (пористость) = 0,2, $K_f = 1 \times 10^{-6}$ м/сут, I (напорный градиент) = 0,2.

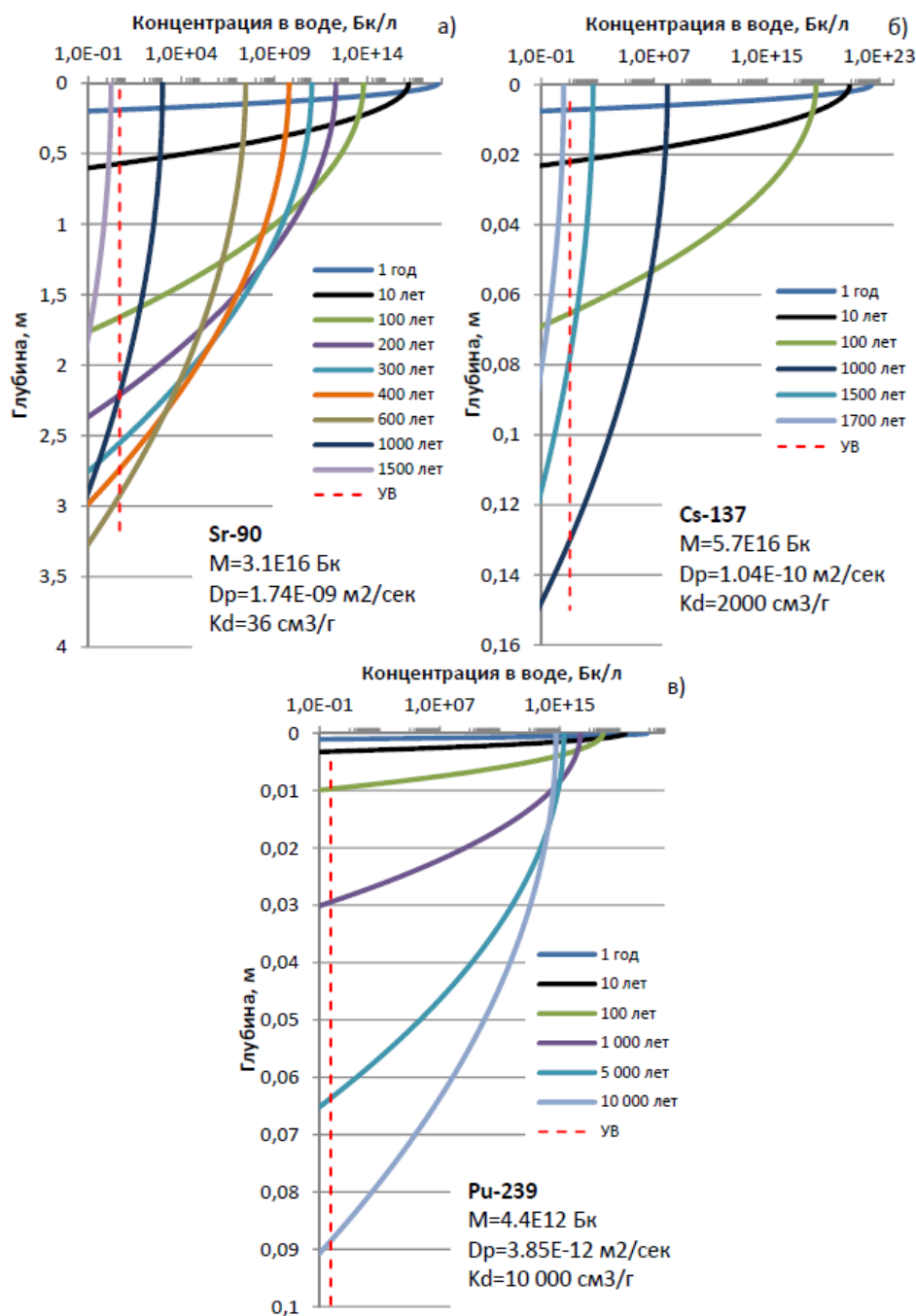


Рисунок 9. Результаты расчетов по сценарию 1 [37]
 а) – ^{90}Sr , б) – ^{137}Cs , в) – ^{239}Pu ; красная штриховая линия на графиках – УВ согласно НРБ-99/2009.

Сценарий 2: быстрая миграция радионуклидов из зоны хранилища в вендский водоносный комплекс при механическом нарушении сплошности глинистого массива. Для данного сценария доминирующим механизмом миграции выступает конвективно-дисперсионный перенос в водоносном комплексе, где скорость распространения загрязнения зависит от фильтрационной способности водоносного комплекса [37].

Результаты расчетов по второму сценарию, выполненных при $\rho = 1700 \text{ кг/м}^3$, $n = 0,3$, T (коэффициент водопроницаемости) $= 180 \text{ м}^2/\text{сут}$, m (мощность горизонта) $= 60 \text{ м}$, $I = 0,000625$, приведены в таблице 8:

Таблица 8. Расчетные параметры для сценария 2 [37]

Параметр	^{90}Sr	^{137}Cs	^{239}Pu
$K_d \text{ min, см}^3/\text{г}$	10	100	1500
$D_p \text{ max, м}^2/\text{с}$	$1,16 \times 10^{-10}$	$1,16 \times 10^{-10}$	$1,16 \times 10^{-10}$
$\lambda, \text{ сут}^{-1}$ ($T_{1/2}$)	$6,52 \times 10^{-5}$ (29,12 лет)	$6,33 \times 10^{-5}$ (30,00 лет)	$7,89 \times 10^{-8}$ (24065,51 лет)
Суммарная активность ПЗРО, Бк	$3,1 \times 10^{16}$	$5,7 \times 10^{16}$	$4,4 \times 10^{12}$
Максимальная длина пути миграции, м	150	45	52
Время полной реабилитации, года	1000	1100	—*

* – прогноз на 10 тыс. лет.

Максимальная длина переноса, как и в сценарии 1, характерна для ^{90}Sr и составляет 150 м. Длины путей миграции ^{137}Cs и ^{239}Pu не превышают 55 м, что связано с высокими сорбционными свойствами пород, слагающих вендский водоносный комплекс.

Прогнозы по второму сценарию показали, что даже при самых неблагоприятных условиях аварии (отсутствие инженерного барьера и нарушение сплошности глинистого массива), загрязнения радионуклидами вод Финского залива в сколько-либо заметном количестве не произойдет. Действительно, область разгрузки вендского водоносного комплекса отнесена в северо-западном направлении на 25-30 км от площадки ПЗРО. Кроме того, зона радионуклидного загрязнения, которой мы соотносим максимальную длину пути миграции в водоносном комплексе, останется в пределах санитарно-защитной зоны, которая ограничивает площадку Ленинградского отделения филиала Северо-западный территориальный округ ФГУП «РосРАО» окружностью 2 км [37].

При оценке последствий возможной радиационной аварии также стоит рассмотреть третий, предложенный нами, предельный сценарий: мгновенное попадание половины, оказавшихся вдруг растворенными, захороненных отходов в Балтийское море. Ранее было отмечено, что 95% от общей активности РАО в предполагаемом ПЗРО принадлежит ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{60}Co . Вследствие того, что ^{60}Co обладает относительно низким $T_{1/2}$ (~5 лет), предположим, что суммарная активность РАО, попавших в Балтийское море, распределена поровну между ^{90}Sr и ^{137}Cs (табл. 9).

Таблица 9. Расчетные параметры для сценария 3

Радионуклид	Суммарная активность ПЗРО, Бк	Максимальная удельная активность в воде Балтийского моря, Бк/кг*	Удельная активность в воде Балтийского моря после аварии, Бк/кг**	УВ ^{вода} , Бк/кг***
⁹⁰ Sr	$0,5 \times 10^{16}$	0,02	0,25	4,9
¹³⁷ Cs	$0,5 \times 10^{16}$	0,04	0,27	11

* – по данным HELCOM на 2010 г. [49];

** – при объеме водной массы Балтийского моря, равном 22 тыс. км³;

*** – согласно НРБ-99/2009.

В рамках предельного сценария также необходимо учитывать процессы седиментации и вынос радионуклидов за пределы акватории. В случае аварии на Чернобыльской АЭС общее содержание ¹³⁷Cs в Балтийском море увеличилось в 1986 году более чем в десять раз, но к 1991 году уменьшилось наполовину за счет процессов осаждения и выноса радионуклидов за пределы региона [50].

Исходя из значений удельной активности радионуклидов в воде Балтийского моря, полученных при 3 сценарии, можно рассчитать эффективную дозу, полученную взрослым человеком за год при потреблении воды из Балтийского моря. Согласно НРБ-99/2009, в год взрослый человек потребляет 730 литров воды. Результаты расчетов приведены в таблице 10.

Таблица 10. Результаты расчета эффективной дозы, полученной взрослым человеком при потреблении воды из Балтийского моря при сценарии 3

Параметр	Эффективная доза, мЗв	Суммарная эффективная доза, мЗв	Предел дозы (ПД) облучения населения за год, мЗв*
⁹⁰ Sr	~0,006	~0,01	1
¹³⁷ Cs	~0,003		

* – согласно НРБ-99/2009.

Из таблицы видно, что при годовом потреблении воды из Балтийского моря взрослым человеком эффективная доза облучения не превысит сотой доли ПД, установленной для населения.

Таким образом, полученные оценки позволяют сделать вывод, что предполагаемый к возведению ПЗРО не окажет негативного воздействия на человека. Кроме того, вклад в радиоактивное загрязнение Балтийского моря при третьем сценарии будет сопоставим с другими источниками поступления радионуклидов в бассейн Балтийского моря (табл. 11).

Таблица 11. Накопления ^{90}Sr и ^{137}Cs в Балтийском море (по [50] с дополнениями)

Источник	^{90}Sr , ТБк	^{137}Cs , ТБк
Чернобыльские выпадения	80	3700-4600
Глобальные выпадения в результате испытаний ядерного оружия	600	900
Западноевропейские заводы по переработке ОЯТ (Селлафилд и Ла-Аг)	40	250
Гипотетический прямой сброс РАО из ПЗРО	5000	5000

2.5. Ситуация с захоронением радиоактивных отходов в толще верхнекотлинских глин (г. Сосновый Бор)

Нами были выделены 4 основные проблемы, связанные с захоронением РАО в толще верхнекотлинских глин на предполагаемом участке размещения ПЗРО вблизи г. Сосновый Бор:

1. В регионе, где расположена приоритетная по результатам ОВОС площадка, проходит полоса разломов, имеющая наибольшую современную активность;
2. Глинистая толща, выбранная в качестве естественного барьера безопасности ПЗРО, является трещиновато-блочной средой;
3. Возможное несоответствие существующим требованиям размещения пункта окончательной изоляции РАО;
4. Несогласия общественности с планированным возведением ПЗРО на данном участке.

В качестве неудачного опыта захоронения промышленных отходов стоит привести пример эксплуатации полигона «Красный Бор», расположенного в Тосненском районе Ленинградской области. С 1970 г. промышленные отходы складировались в специальные котлованы глубиной 25-30 м. На стадии проектирования этого полигона толща «синих» кембрийских глин рассматривалась как однородная тонкодисперсная среда, имеющая

низкую проницаемость. Расчет времени проникновения потока загрязненных вод из котлованов полигона до кровли ломоносовского водоносного горизонта составил 2000 лет. Однако на основе расчета, учитывающего трещинноватость глин и гидродинамические условия ломоносовского водоносного горизонта, было высказано предположение, что загрязнение подземных вод происходило уже в первые года эксплуатации полигона. Предположение оказалось верным: химический анализ вод, разгружающихся в понижениях рельефа зоны влияния полигона, показал их полную идентичность с составом жидкой фазы складированных отходов [39].

Как уже отмечалось ранее, в случае аварии на предполагаемом к возведению ПЗРО загрязнение радионуклидами может достичь вендского водоносного комплекса, разгрузка вод которого происходит в 25-30 км к северо-западу от площадки ПЗРО в Финском заливе.

Площадка, выбранная для строительства приповерхностного ПЗРО, находится в 6 км от г. Сосновый Бор, в 35 км от г. Санкт-Петербург и в 1,5 км от побережья Копорской губы Финского залива, что противоречит требованиям следующих нормативных документов:

1. ГОСТ Р 52037-2003 «Могильники приповерхностные для захоронения радиоактивных отходов. Общие требования»;
2. НП 055-14 «Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности»

Пункт 6.2 настоящего ГОСТ гласит, что:

- во-первых, «площадка должна иметь топографию, не способствующую затоплению, и не должна быть расположена в прибрежной зоне, в поймах рек и болотистой местности»;
- во-вторых, «не допускается использовать места с активными тектоническими процессами, с высокой сейсмической и вулканической активностью»;
- в-третьих, «места размещения могильников должны быть удалены от населенных районов».

Пункт 48 и 52 НП 055-14, связанные с размещением ПЗРО, по своему смыслу соответствуют вышеуказанным требованиям ГОСТ.

Тем не менее данные нормативные документы не содержат числовые параметры необходимой удаленности объекта окончательной изоляции РАО от населенных пунктов и прибрежных зон, что позволяет трактовать их требования в частных интересах.

По словам Н. Кузьмина, члена Комитета ГД по природным ресурсам, природопользованию и экологии, «от города-миллионника такой объект нельзя строить в радиусе 100 км, а от ПЗРО до Петербурга всего 40 км. От берега должно быть расстояние не менее двух км, а у нас 800 метров от вод Балтики» [52], однако в действительности существуют лишь «числовые» требования, касающиеся расстояния от АЭС до границ городов [53]. Следует отметить, что эти требования в случае с ЛАЭС-2 нарушаются: расстояние от строящейся станции до Санкт-Петербурга составляет менее 100 км.

Слушания, посвященные обсуждению ОВОС запланированного к строительству ПЗРО, прошли 27 декабря 2013 г. в Сосновом Бору. Поводом для негодования общественности послужило то обстоятельство, что по прогнозным оценкам объем хранилища к 2030 г. будет увеличен с 50 до 200-250 тыс. м³. По их мнению, это означало, что помимо отходов, хранящихся на территории Ленинградской области (около 100 тыс. м³), будут захоронены и другие, «чужие» РАО. Однако, по мнению исполнителей ОВОС, расширение планируемого ПЗРО связано с выводом из эксплуатации энергоблоков ЛАЭС-1 [37].

В настоящий момент решение о создании хранилища еще не принято. Первоначальная модель ядерного могильника отвергнута, поскольку создание пункта захоронения радиоактивных отходов на большой глубине признано экономически нецелесообразным [54]. Национальным оператором по обращению с РАО объявлен конкурс на разработку обоснования инвестиций по созданию объекта [55].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема захоронения радиоактивных отходов является в настоящее время одной из важнейших проблем атомной промышленности: в соответствии с принятым в 2011 году законом, колоссальные объемы отходов, накопленные на территории нашей страны, подлежат обязательному захоронению.

При решении задач для достижения поставленной цели, обозначенной как «проанализировать основные проблемы, связанные с захоронением образовавшихся на территории Ленинградской области РАО в глинах на примере участка предполагаемого строительства пункта захоронения радиоактивных отходов вблизи г. Сосновый Бор», было установлено, что:

1. Преобладающий вклад в суммарную активность накопленных на территории России РАО принадлежит военной деятельности по наработке оружейного плутония;

В зависимости от задачи РАО могут классифицироваться по многим признакам, основными из которых являются: активность, агрегатное состояние и период полураспада радионуклидов, в них содержащихся. Отдельных классификаций РАО по тепловыделению и объему не существует;

В настоящее время существует 2 способа захоронения РАО: приповерхностный и глубинный. Приповерхностный способ предназначен для захоронения твердых и отвержденных короткоживущих отходов на глубинах до 100 м, второй – для захоронения высокоактивных или долгоживущих радиоактивных альфа-содержащих отходов на глубинах более 100 м от поверхности земли.

2. В четырех странах объемы накопленных отходов превышают 1 млн. м³: Великобритании, Канаде, США и Франции. Причем только США имеют объемы РАО, превышающие 100 млн. м³;

Наиболее распространенный способ захоронения РАО – приповерхностный; способ глубинного захоронения реализован только в четырех странах: Венгрии, Германии, США и Финляндии;

На территории России накоплен наибольший в мире объем РАО, который составляет 560 млн. м³; при этом лишь 11 % этого объема захоронено. Используемый способ захоронения отходов путем закачки в пласты-коллекторы противоречит Водному кодексу РФ.

3. Свойствами глинистых пород, позволяющими считать их перспективной средой для захоронения радиоактивных отходов, являются: водоупорность, поглощающая способность и высокая удельная поверхность, пластичность, набухаемость, стабильность. Очень существенно то, что глинистые породы по проницаемости относятся к весьма слабопроницаемым и почти непроницаемым горным породам ($K_f < 1,2 \times 10^{-6}$ м/с, $K_p < 1,2 \times 10^{-13}$ м²).
4. Максимальная интенсивность возможных сейсмических сотрясений в районе предполагаемого места размещения ПЗРО составляет 6 баллов;
Верхнекотлинский водоупорный горизонт граничит с ломоносовским водоносным горизонтом сверху и вендским водоносным комплексом снизу. Разгрузка вод вендского водоносного комплекса происходит в 25-30 км к северо-западу от площадки ПЗРО в Финском заливе;
Верхнекотлинский водоупорный горизонт – трещиновато-блочная среда, присутствие межблочных трещин в которой повышает проницаемость глин на 2-3 порядка.
5. При самых неблагоприятных условиях аварии (отсутствие инженерного барьера и нарушение сплошности глинистого массива), загрязнения радионуклидами вод Финского залива не произойдет. Максимальная длина пути миграции радионуклидов в вендском водоносном комплексе составит 150 м. Если предположить, что половина захороненных РАО попадет в Балтийское море, то при годовом потреблении воды взрослым человеком эффективная доза облучения не превысит сотой доли ПД, установленной для населения.

Кроме этого, при проведении работы нами были выделены 4 существенные проблемы, связанные с захоронением РАО в глинах на примере предполагаемом участке размещения ПЗРО вблизи г. Сосновый Бор (Ленинградская обл.):

1. В регионе, где расположена приоритетная по результатам ОВОС площадка, проходит полоса разломов, имеющая наибольшую современную активность;
2. Глинистая толща, выбранная в качестве естественного барьера безопасности ПЗРО, является трещиновато-блочной средой;
3. Возможное несоответствие существующим требованиям размещения пункта окончательной изоляции РАО;
4. Несогласия общественности с планированным возведением ПЗРО на данном участке.

Результаты оценки масштаба экологических последствий возможной радиационной аварии при самых неблагоприятных условиях показали, что предполагаемый к возведению ПЗРО не окажет негативного воздействия на человека.

Подводя итог, можно сделать вывод, что захоронение отходов в глинах, несмотря на определенные трудности, действительно является перспективным способом их окончательной изоляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проект кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ «Ядерная физика в Интернете» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/index.html>. – Дата обращения: 23.05.2017.
2. Международное экологическое объединение «Беллона». Первой в мире атомной станции исполнилось 60 лет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bellona.ru/2014/06/27/pervoj-v-mire-atomnoj-stantsii-ispolni/>. – Дата обращения: 23.05.2017.
3. World Nuclear Association. Electricity supplied by nuclear energy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://world-nuclear.org/nuclear-basics/electricity-supplied-by-nuclear-energy.aspx>. – Дата обращения: 23.05.2017.
4. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. – М.: ИздАТ, 2000. – 384 с.
5. Нормы радиационной безопасности. НРБ-76/87. Утверждены Главным государственным санитарным врачом СССР 26.05.1987.
6. Федеральный закон от 21.11.1995 N 170-ФЗ (ред. от 03.07.2016) «Об использовании атомной энергии».
7. Белозерский Г.Н. Радиационная экология: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Г.Н. Белозерский. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 384 с.
8. Федеральный закон от 11.07.2011 N 190-ФЗ (ред. от 02.07.2013) «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изм. и доп., вступающими в силу с 16.07.2013).
9. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 26.04.2010 N 40 (ред. от 16.09.2013) «Об утверждении СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)» (вместе с «СП 2.6.1.2612-10. ОСПОРБ-99/2010. Санитарные правила и нормативы...») (Зарегистрировано в Минюсте России 11.08.2010 N 18115).
10. МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Классификация радиоактивных отходов, Серия норм МАГАТЭ по безопасности, № GSG-1, МАГАТЭ [Электронный ресурс]. – Вена, 2014. – Режим доступа: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1419r_web.pdf. – Дата обращения: 03.03.2017.

11. Козырев Д.В. Планы Российской Федерации по созданию объектов приповерхностного захоронения РАО. Доклад на семинаре Контактной Экспертной Группы МАГАТЭ «Окончательная изоляция радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива – опыт и планы» [Электронный ресурс]. – Боммерсвик (Швеция), 24-25 февраля 2009 года. – Режим доступа: www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/CEG/ceg_reports.html. – Дата обращения: 03.03.2017.
12. ГОСТ Р 50996-96. Сбор, хранение, переработка и захоронение радиоактивных отходов. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 17606-81; введ. 01.07.1997. – ИПК Издательство стандартов, Москва, 1996.
13. Приказ Ростехнадзора от 22.08.2014 N 379 «Об утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности» (вместе с «НП-055-14. Федеральные нормы и правила...») (Зарегистрировано в Минюсте России 02.02.2015 N 35819).
14. Информационный портал «Российское атомное сообщество». Геологическое захоронение радиоактивных отходов – самый безопасный метод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atomic-energy.ru/news/2017/01/11/27975>. – Дата обращения: 03.03.2017.
15. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО [Электронный ресурс]. – М.: Изд-во «Комтехпринт», 2015. – Режим доступа: <http://www.norao.ru/upload/obzor.compressed.pdf>. – Дата обращения: 12.03.2017.
16. The Nuclear Energy Agency, Radioactive Waste Management Programmes in OECD/NEA Member Countries – Belgium [Электронный ресурс]. – NEA, 2005. – Режим доступа: <http://www.oecd-neo.org/>. – Дата обращения: 12.03.2017.
17. The Nuclear Energy Agency, Radioactive Waste Management and Decommissioning in Hungary Report [Электронный ресурс]. – NEA, 2009. – Режим доступа: <http://www.oecd-neo.org/>. – Дата обращения: 12.03.2017.
18. International Atomic Energy Agency, Estimation of Global Inventories of Radioactive Waste and Other Radioactive Materials [Электронный ресурс]. – IAEA, Vienna, 2008. – Режим доступа: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1591_web.pdf. – Дата обращения: 12.03.2017.
19. The IAEA's Power Reactor Information System (PRIS). Operational & Long-Term Shutdown Reactors, Reactor Status Reports [Электронный ресурс]. – Режим

- доступа:
<https://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx>. – Дата обращения: 10.04.2017.
20. ГК «Росатом». Отчёт по безопасности за 2015 г [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://www.rosatom.ru/upload/iblock/e21/e21ced22b2cc8d7fed8d83cadab6d0b8.pdf>. – Дата обращения: 12.03.2017.
21. ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами». Отчет по экологической безопасности за 2015 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.norao.ru/upload/catalog_NORAO_200x200%20\(2\).pdf](http://www.norao.ru/upload/catalog_NORAO_200x200%20(2).pdf). – Дата обращения: 12.03.2017.
22. ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами». Глубинная закачка жидких радиоактивных отходов [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
http://www.atomeco.org/mediafiles/u/files/Prezentetion_31_10_2013/Speshilov.pdf. – Дата обращения: 02.04.2017.
23. Информационный портал «Российское атомное сообщество». Окончательная изоляция ЖРО в глубоководных пластах-коллекторах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atomic-energy.ru/technology/40649>. – Дата обращения: 02.04.2017.
24. «Водный кодекс Российской Федерации» от 03.06.2006 N 74-ФЗ (ред. от 31.10.2016).
25. ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами». Финальная изоляция радиоактивных отходов 3 и 4 классов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.norao.ru/about/isolation/>. – Дата обращения: 12.03.2017.
26. Информационный портал «Российское атомное сообщество» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atomic-energy.ru/publications>. – Дата обращения: 12.03.2017.
27. «Рекламно-информационное агентство «PRo Атом». Обращение с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=6544>. – Дата обращения: 12.03.2017.

28. ФГУП «Производственное объединение «Маяк». Новости предприятия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.pomayak.ru/wps/wcm/connect/mayak/site/info/news_main/135e0e804ab8cbca9c3efdbf1fccf96e. – Дата обращения: 09.05.2017.
29. Международное экологическое объединение «Беллона». Слушания в Новомуральске: опасения общественности и оптимистические заверения НО РАО [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bellona.ru/2017/03/06/novouralsk-przgo/>. – Дата обращения: 22.05.2017.
30. Пешковский Л.М., Перескокова Т.М. Инженерная геология: Учебное пособие для студентов вузов / Пешковский Л.М., Перескокова Т.М. – М.: Высш. школа, 1982. – 341 с.
31. Сайт «Горной энциклопедии» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mining-enc.ru/>. – Дата обращения: 03.04.2017.
32. Атлас текстур и структур осадочных горных пород. Ч. 1: Обломочные и глинистые породы / Всесоюз. науч.-исслед. геол. ин-т «ВСЕГЕИ» М-ва геологии и охраны недр СССР / Сост. Е.В. Дмитриевой, Г.И. Ершовой, Е.И. Орешниковой; под рук. М.Ф. Викуловой и А.В. Хабакова; науч. ред. А.В. Хабаков. – М.: Госгеолтехиздат, 1962. – 578 с.
33. Савоненков В.Г., Андерсон Е.Б., Шабалев С.И. Глины как геологическая среда для изоляции радиоактивных отходов. – СПб: ИД «Инфо Ол», 2012. – 215 с.
34. Изотова А.В., Белозерский Г.Н., Савоненков В.Г., Шабалев С.И. Роль природных и инженерных барьеров при захоронении радиоактивных отходов. – Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2015. Вып. 4. – С. 110-123.
35. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. – М.: ГЕОС, 2013. – 578 с.
36. Соколов В.Н. Глинистые породы и их свойства // Соросовский образовательный журнал, 2000. № 9. С. 59-66.
37. ФГУП «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами РосРАО». Материалы оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) при размещении приповерхностного пункта захоронения радиоактивных отходов низкого и среднего уровней активности в районе Ленинградского отделения филиала «Северо-Западного территориального округа ФГУП «РосРАО», 2012. – 266 с.
38. И.А. Суханов, А.Г. Литвиненко, В.Т. Сорокин. Создание пункта захоронения низко- и среднеактивных РАО в Ленинградской области // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. – 2011. – № 1. – С. 59-64.

39. Еремеева А.А. Инженерно геологическая и геоэкологическая оценка условия захоронения промышленных отходов в нижнекембрийских глинах Ленинградской области: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. геол.-мин. наук. – СПб, СПб-ГИ, каф. гидрогеологии и инженерной геологии, 2002. – 21 с.
40. ФГБУ «ВСЕГЕИ». Геологический словарь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.vsegei.ru/ru/info/geodictionary/article.php?ELEMENT_ID=41660. – Дата обращения: 25.05.2017.
41. Департамент по недропользованию по Северо-Западному федеральному округу [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sevzapnedra.nw.ru/GMCN/system1.htm>. – Дата обращения: 16.05.2017.
42. Воронов А.Н., Виноград Н.А. Гдовский водоносный комплекс – источник пресных, минеральных и промышленных вод // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География, 2006. № 4. С. 88-95.
43. Румынин В.Г., Никуленков А.М. Зональность физических свойств котлинских глин вендской системы (северо-запад Русской платформы) // Записки Горного института, 2012. Том № 197. С. 191-196.
44. Дашко Р.Э., Александрова О.Ю., Котюков П.В., Шидловская А.В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2011. – № 1. – С. 1-47.
45. Санкт-Петербургский государственный университет. Место под пункт захоронения радиоактивных отходов обсудят в декабре [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://spbu.ru/smi/uchenye-spbgu/783-kultura-i-obshchestvo/17913-mesto-pod-punkt-zakhoroneniya-radioaktivnykh-otkhodov-obsudyat-v-dekabre.html>. – Дата обращения: 27.05.2017.
46. Филиал «Северо-западный территориальный округ» ФГУП «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами РосРАО». Отчет по экологической безопасности за 2015 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rosrao.ru/assets/lib/assets/lib/12/szto-eco-report-2015.pdf>. – Дата обращения: 29.05.2017.
47. Информационный портал «Российское атомное сообщество». Перспективы использования площадок ФГУП «РосРАО» для окончательной изоляции радиоактивных отходов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2017/01/11/28916>. – Дата обращения: 02.06.2017.

48. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009» (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 7 июля 2009 г. N 47).
49. HELCOM, 2013. Thematic assessment of long-term changes in radioactivity in the Baltic Sea, 2007-2010. Balt. Sea Environ. Proc. No. 135. Number of pages: 40.
50. Информационный портал «Российское атомное сообщество». Балтийское море: радиационная обстановка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2009/11/19/6222?page=1701>. – Дата обращения: 02.06.2017.
51. ГОСТ Р 52037-2003. Могильники приповерхностные для захоронения радиоактивных отходов. Общие требования. – Введ. 01.01.2004. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003.
52. Санкт-Петербургские ведомости. Последний путь мирного атома [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://old.spbvedomosti.ru/article.htm?id=10308837@SV_Articles. – Дата обращения: 25.05.2017.
53. «СНиП 2.01.51-90. Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны» (утв. Постановлением Госстроя СССР, Госплана СССР и Минобороны СССР от 26.04.1990 N 1с).
54. «РосБизнесКонсалтинг». Росатом меняет концепцию ядерного могильника в Сосновом Бору [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rbc.ru/spb_sz/15/07/2015/55a6058e9a79475cb1318d71. – Дата обращения: 03.06.2017.
55. Nuclear.Ru – независимый информационно-аналитический портал атомной отрасли [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nuclear.ru/>. – Дата обращения: 27.05.2017.